

Tuomas Räisänen

KONENÄKÖKAMEROIDEN TESTAUSYMPÄRISTÖ

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikka ja liikenne
Tietotekniikka
Kevät 2008



**Kajaanin
ammattikorkeakoulu**

OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Tuomas Räisänen	
Työn nimi Konenäkökameroiden testausympäristö	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Konenäkö ja mittaustekniikka	Ohjaaja(t) Matti Sarén, Pentti Romppainen
	Toimeksiantaja Metso Automation, Kajaani
Aika Kevät 2008	Sivumäärä ja liitteet 61+5
<p>Metso on kansainvälinen teknologiakonserni, joka palvelee asiakkaita massa- ja paperiteollisuudessa, kiven- ja mineraalienkäsittelyssä, energiateollisuudessa sekä valituilla muilla teollisuudenaloilla. Metson Kajaanin yksikkö on erikoistunut sellu- ja paperiteollisuuden mittalaitteiden sekä analysointilaitteiden tuotteistamiseen. Yksikkö hyödyntää vahvasti konenäköön perustuvia mittausmenetelmiä mittalaitteissaan.</p> <p>Insinööritöiden tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa konenäkökameroille testialusta, jossa voitaisiin testata Firewire- ja USB2.0 -liitännäisiä konenäkökameroita sekä arvioida kuvaussysteemillä otetun kuvan laatua. Erityisesti työssä pyrittiin luomaan alusta kuvaussysteemin piirtokyvyn sekä kuvausvirheiden määrittämiseen.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käsitellään konenäköjärjestelmään kuuluvia osia sekä niiden merkitystä kuvaussysteemille. Teoriaosuudessa käsitellään myös erilaisia kuvan laatuun vaikuttavia tekijöitä sekä mittausmenetelmiä kuvaussysteemin hyvyyden selvittämiseksi.</p> <p>Insinööritöiden käytännön osuudessa toteutettiin testipenkki käytetyille kameroille sekä kuvaussysteemiä testaava ohjelmisto. Toteutetun ohjelmiston mittaustoiminnot perustuvat teoriaosuudessa käydyn kuvan laadun arviointi- sekä testausmenetelmiin.</p> <p>Testausympäristöllä suoritettujen testien tulokset olivat odotetun kaltaisia ja tukivat käytettyä teoriaa. Suurin haaste oli luoda tasainen ja ideaalinen valaistus jokaiselle testille, jotta tulokset olisivat hyväksyttävissä. Insinööritöille asetettavat tavoitteet saavutettiin ja testien toistettavuus oli riittävä.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Konenäkö, kuvan laatu
Säilytyspaikka	<input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Tuomas Räisänen	
Title A Testing Environment for Machine Vision Cameras	
Optional Professional Studies Machine Vision and Measurement Technology	Instructor(s) Matti Sarén, Pentti Romppainen
	Commissioned by Metso Automation, Kajaani
Date Spring 2008	Total Number of Pages and Appendices 61 +5
<p>Metso is a global engineering and technology corporation serving customers in pulp and paper industry, rock and minerals processing and energy industry. Metso Kajaani product line is specialized in designing measurement equipment and analyzers for pulp and paper industry. Kajaani products also use machine vision technology in some of their analyzers. The goal of this Bachelor's thesis was to design and develop a test environment for machine vision cameras and optics.</p> <p>The thesis is divided roughly into three sections. The theory survey includes information about machine vision systems in general and the basics behind image quality. The theory part also handles methods how to evaluate an entire imaging system or just part of it. In the practical part are presented the building steps of testing environment. Designing the testing environment required mechanical designing and programming skills. In the testing part the results of the environments testing phase are presented. The goal of the testing phase was to test the designed environment with different machine vision cameras and optics.</p> <p>The designed testing environment is working and most of the goals of the thesis were achieved. The most challenging task was to create stable and ideal lighting for each test to achieve valid results. Making allowances to the lighting the results of the test environment were valid according to the used theory.</p>	
Language of Thesis Finnish	
Keywords	Machine Vision, Image quality
Deposited at	<input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Tämä insinöörityö tehtiin Metso Automationin Kajaanin yksikön toimeksiannosta. Haluan kiittää Matti Sarénia koulutustani vastaavasta aiheesta sekä tuesta ja ohjauksesta työn etene-
misen aikana. Haluan kiittää myös Pentti Romppaista työn ohjauksesta sekä työn tiimoilta
käydyistä keskusteluista. Kiitokset kuuluvat myös Eero Soiniselle kieliasun ohjauksesta sekä
muille työn edistämistä edesauttaneille tahoille.

Kajaanissa 9.4.2008

Tuomas Räisänen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄN RAKENNE	2
2.1 Digitaalisten kameroiden luokittelu	3
2.2 Kennotyypit	3
2.2.1 Signaalikohinasuhde	5
2.3 Optiikan merkitys kuvauksessa	6
2.3.1 Kuvausvirheet	8
2.3.2 Syvyysterävyys	9
2.3.3 Modulaation siirtofunktio	9
2.4 Kameraliitännät	10
3 TYÖSSÄ KÄYTETTY LAITTEISTO JA OHJELMISTO	12
3.1 Testilaitteiston rakenne	12
3.2 Kisko ja pitimet	12
3.3 Testikuviot	14
3.3.1 USAF 1951 -testikuvio	14
3.3.2 Syvyysterävyys	15
3.3.3 Pistekuvio	16
3.3.4 Mikrometrilasi	17
3.4 Testatut kamerat ja optiikat	18
3.4.1 Foculus FO442SB	18
3.4.2 uEye1545LE	19
3.5 Käytetyt objektiivit	20
3.6 Ohjelmistot	21
4 OHJELMISTON TOTEUTUS	22
4.1 Ohjelmiston ja käyttöliittymän määrittely	22
4.2 Ohjelman toteuttaminen	23
4.3 Ohjelman välilehdet ja toiminnot	23
5 TESTAUSMENETELMÄT	33
5.1 Testauksen tavoite	33
5.2 Modulaation siirtofunktio	33

5.3 Signaalikohinasuhde	35
5.4 Kennon lineaarisuus	37
5.5 Vääristymien määrittäminen	38
5.6 Kuvausnopeus	40
5.7 Syvyysterävyyden määrittäminen	41
5.8 Toteutetun ohjelman testaaminen	44
5.9 Testijärjestelyt	46
 6 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	 48
6.1 uEye1545LE-kameran tulokset	48
6.2 Foculus442SB-kameran tulokset	53
6.3 Tulosten tarkastelu	58
 7 YHTEENVETO	 60
 LÄHTEET	 61
 LIITTEET	

1 JOHDANTO

Metso-konserni on kansainvälinen teknologiakonserni, joka palvelee asiakkaita massa- ja paperiteollisuudessa, kiven- ja mineraalienkäsittelyssä ja energiateollisuudessa. Samaan konserniin kuuluu Metso Automation, jonka avainosaamiseen kuuluu prosessiteollisuuden automaattioratkaisut.

Metso Automationin Kajaanin yksikössä suunnitellaan ja valmistetaan mittaus- ja säätölaitteita sekä analysaattoreita sellu- ja paperiteollisuuteen. Osassa yksikön suunnittelemista analysaattoreista hyödynnetään konenäköä kohteen mittaamisessa ja analysoimisessa. Konenäöllä suoritettu mittaaminen asettaa korkeat kriteerit käytettävälle kameralle sekä optiikalle, jotta analysoitava kuva olisi mahdollisimman laadukas.

Kuvaussysteemien testaukseen on kehitetty tapoja, joilla voi testata yksittäisen tekijän, kuten objektiivin tai kennon tai koko systeemin hyvyttä. Systeemin hyvyyden mittoina käytetään usein erotuskykyä tai modulaation siirtofunktiota.

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutustua kuvausjärjestelmän testaustapoihin sekä toteuttaa toimiva testausympäristö konenäkökameroille sekä objektiiveille.

2 KONENÄKÖJÄRJESTELMÄN RAKENNE

Konenäköjärjestelmiä käytetään yleisesti teollisuuden eri aloilla. Usein konenäköjärjestelmien sovellutukset liittyvät erilaisten prosessien automatisointiin sekä laadunvalvontaan. Konenäköä käytetään ihmisen tilalla esimerkiksi prosessin vaikeissa ja ihmissilmälle mahdottomissa tilanteissa.

Konenäköjärjestelmä koostuu yleensä kamerasta, optiikasta, valaistuksesta sekä ohjelmasta, jonka tehtävänä on muokata ja analysoida otettuja kuvia. Kuvan muodostuksessa käytetään objektiiveja sekä kameran sisällä olevaa valolle herkkää ilmaisinta. Myös kuvaushetken valaistus on tärkeässä roolissa kuvanmuodostuksessa.

Konenäköjärjestelmien kamerat pyritään suunnittelemaan siten, että niillä pystyttäisiin tekemään tarkkoja mittauksia suurella kuvausnopeudella. Kameroiden yleisimmät anturit perustuvat CCD- tai CMOS-tekniikkaan, jotka eroavat hieman rakenteensa puolesta toisistaan. Nämä anturit koostuvat kuvaelementeistä eli pikseleistä, jotka muodostavat matriisin. Suurilla kennoilla päästään suureen tarkkuuteen, sillä kuvaelementtien lisääntyessä voidaan toistaa pienempiä yksityiskohtia.

Pelkästään kennon koko ei ole tae hyvälle kuvan laadulle, sillä kennolle muodostuva kuva riippuu myös optiikasta. Optiikan ja objektiivien valintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, jos kuvattavasta kohteesta halutaan erottaa pieniä yksityiskohtia.

Kohteeseen vaikuttava valaistus on pyrittävä saamaan mahdollisemman vakaaksi, jotta kuvankäsittely olisi helpompaa. Hyvä valaistus on yksinkertainen, mutta kuitenkin sellainen, että tarvittava informaatio saadaan talteen.

Kuvankäsittelyn tekee yleensä tietokone, joka analysoi saatuja kuvia ohjelmallisesti. Kuvankäsittelyllä kuvasta etsitään kulloisenkin sovelluksen kannalta kiinnostavia kohteita. Kuvankäsittely koostuu karkeasti esiteltynä kolmesta eri vaiheesta, jotka ovat esikäsittely, segmentointi ja analyysi.

Esikäsittelyssä kuvaa optimoidaan jatkokäsittelyä varten paremmin sopivaksi. Kuvasta voidaan suodattaa pois häiriöitä tai rajata tarkasteltavia alueita, jotta kuvainformaation käsittely olisi nopeampaa.

Kuvan segmentoinnissa kuvasta eritellään kohteita ja reunoja, joita mahdollisesti analyysissä käsitellään. Segmentoinnissa kuvaa voidaan kynnystää binaariseksi, jolloin kuvasta on enää jäljellä kohteet sekä tausta.

Lopulta käsitellylle kuvalle suoritetaan analyysi. Kuva-analyysissä kuvasta voidaan tutkia mm. kuvassa esiintyvien kohteiden muotoa, mittoja, orientaatiota tai kokoa. Analyysistä saatu data voi sisältää mittaustuloksia tai prosessin ohjauksen kannalta tärkeitä tietoja. [1, 2.]

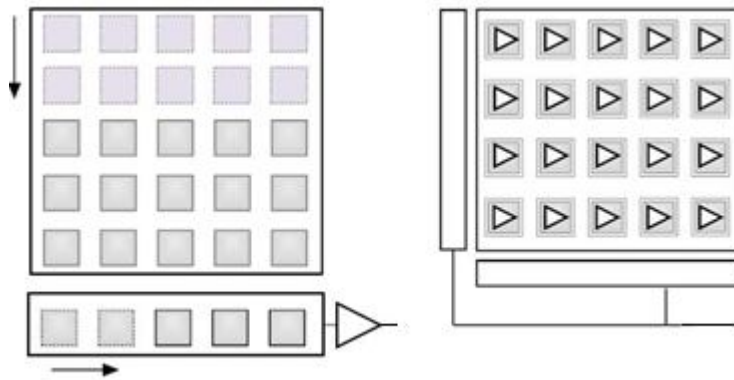
2.1 Digitaalisten kameroiden luokittelu

Digitaaliset kamerat voidaan karkeasti jakaa kuluttajille suunnattuihin ns. harrastekameroihin ja ammattikäyttöön suunnattuihin kameroihin. Harrastekamerat pyritään suunnittelemaan yhdeksi helppokäyttöiseksi kokonaisuudeksi, jolloin kuvaustilanteessa kamera itse hoitaa tarkennuksen, valotuksen sekä kuvan muokkauksen. Yleensä tällaisissa kameroissa optiikka on kiinteänä osana kameraa. Ammattikäyttöön tarkoitetut digitaalikamerat sallivat käyttäjän vaikuttaa paremmin kuvaustilanteeseen sekä optiikkakin on usein vaihdettavissa. Yhteistä molemmille kameratyypeille on, että ne muuttavat kennolle muodostuneen varauksen digitaaliseen muotoon. Tässä työssä käytettiin konenäköön tarkoitettuja kameroita, joiden toimintaa voidaan ohjelmallisesti kontrolloida. [1.]

2.2 Kennotyypit

Kuvan muodostuminen perustuu optiikan ohjaaman valon aiheuttamaan varaukseen kennon pintakerroksessa. Kenno koostuu valoherkistä pikseleistä, jotka muodostavat yhdessä kennon kattavan matriisin. Kennon koko vaikuttaa kuvautuvaan alueen kokoon, maksimi resoluutioon sekä osin objektiivin valintaan. Kuvaustilanteessa kenno altistetaan tietyn ajan valolle, jonka jälkeen varaus muunnetaan jännitteeksi ja kuva esitetään A/D-muuntimen kautta digitaalisessa muodossa. Kennon altistusajan valolle määrää kameran suljin. Läpipääsevän valonmäärää taas säädetään optiikassa olevan himmentimen koolla. Yleisimmät kennotyypit ovat CCD- (Charge Coupled Device) ja CMOS- (Complementary Metal Oxide Semiconductor) kennot. Molempien kennojen toimintaperiaate on sama varauksen siirtoon saakka. [1.]

CCD-tekniikkaan perustuvat kennot poikkeavat hieman rakenteeltaan sekä pikselin kuvainformaation siirrotaan CMOS-kennoihin verrattuna. CCD-kennon pikseleille muodostuneiden varauksien muuntaminen digitaaliseen muotoon vaatii kameralta lisäksi paljon muuta oheiselektroniikka kennon lisäksi. CMOS-tekniikkaan perustuvat kennot taas sisältävät paljon pikseleihin sekä kuvankäsittelyyn liittyvää elektroniikkaa. Kuvassa 1 on esitetty CCD- sekä CMOS-kennon rakenne ja toimintaperiaate pikseleiden kuvainformaation siirrossa. Kuvan neliöt esittivät pikseleitä ja kolmiot vahvistimia.



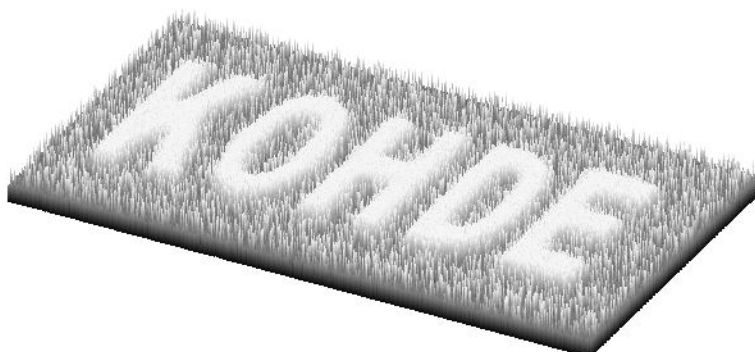
Kuva 1. CCD- ja CMOS-kennon rakenne

CCD-tekniikkaan perustuvassa kennossa pikseleiden varaus siirretään rivi kerrallaan yleensä yhden varaus- jännitemuuntimen kautta jatkokäsittelyä varten. CMOS-kennossa jokaisella pikselillä on oma varaus-jännitemuunnin, jolloin prosessointia voidaan suorittaa pikselikohtaisesti. Kenno voi sisältää myös jatkokäsittelyyn tarvittavaa elektroniikkaa, kuten kohinan suodattimia, vahvistimia sekä A/D-muuntimen. Kennolle sisällytetty elektroniikka lisää CMOS-kennon monimutkaisuutta sekä kasvattaa piirin kokoa, mutta toisaalta piiri ei välttämättä enää tarvitse muuta oheiselektroniikkaa. CCD-kennoille on ominaista verrattuna CMOS-kennoihin mm. suurempi virrankulutus ja pienempi pikselin koko. Kummallakin kennoteknologiolla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa, joten sopiva kenno valitaan sovel-luskohtaisesti. [1, 2, 3, 4.]

2.2.1 Signaalikohinasuhde

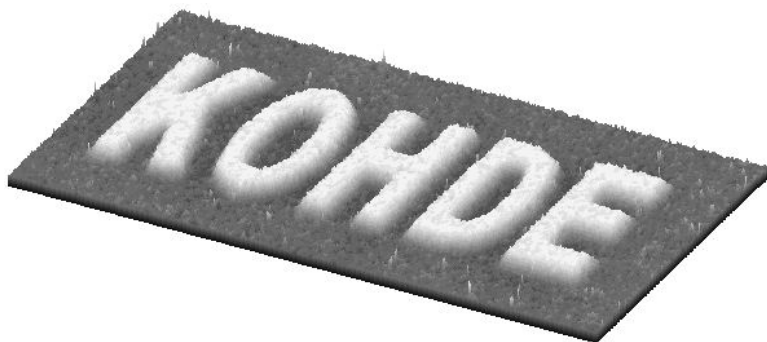
Konenäköjärjestelmissä kuvausympäristö pyritään valaistuksen osalta saamaan mahdollisimman vakaaksi kuvaustilanteissa, jotta kennon aiheuttaman kohinan vaikutus kuvalle olisi mahdollisimman pieni. Valotuksen ohella myös kameran elektroniikka itsessään aiheuttaa kohinaa kuvanottohetkellä. Tässä tapauksessa kohina käsitetään kennon pikseleiden sähköisen varauksen vaihteluina. Kennolla muodostuva kohina voidaan karkeasti jakaa kahteen eri luokkaan: satunnaiseen kohinaan sekä kiinteäkuvioiseen kohinaan. Satunnainen kohina voi johtua kennon lämpenemisestä tai juuri epävakaasta valaistuksesta. Kiinteäkuvioista kohinaa syntyy silloin, kun kameran elektroniikan vahvistimet eivät vahvista signaalia tasaisesti tai kun A/D-muunnos aiheuttaa kvantisaatiokohinaa johtuen bittien rajallisesta määrästä. Kiinteäkuvioiseen kohinaan voidaan lukea myös kennon ns. dark current -ominaisuus, joka on aina kennolla läsnä pienen varauksen muodossa. [1, 2.]

Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva, jossa on nähtävissä kuvattu kohde sekä kuvassa esiintyvää kohinaa.



Kuva 2. Periaatekuva kuvassa esiintyvistä kohinasta

Mikäli kuvataan paikallaan olevaa kohdetta, voidaan teorian perusteella kuva-analyysiä sekä laskentaa hyödyntämällä suodattaa kuvasta kohinaa vähemmäksi keskiarvoistamalla kuvan pikseliarvojen vaihteluita tai käyttämällä erinäisiä suodatuksia. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva suodatetusta kuvasta.



Kuva 3. Periaatekuva suodatetusta kuvasta

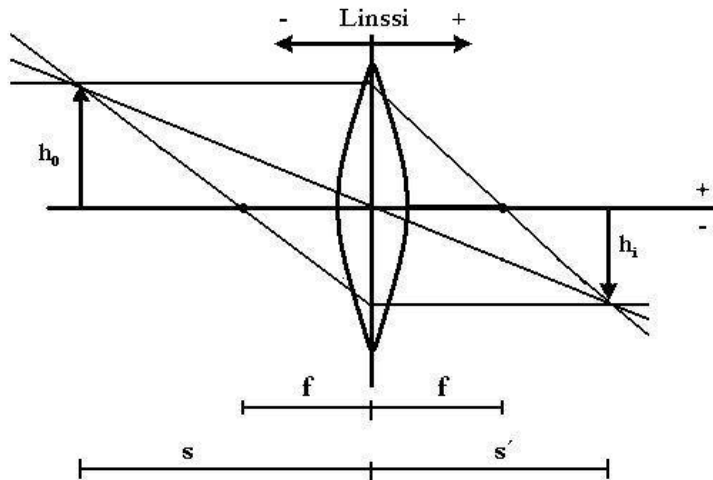
Suodatetulle kuvalle on ominaista pehmeämpi yleisilme. Tämän vuoksi suuret kontrastivaihtelut sekä yksityiskohdat pyrkivät hämärtymään, mikä voi hankaloittaa jatkokäsittelyä.

2.3 Optiikan merkitys kuvauksessa

Kuvan laatuun vaikuttaa oleellisesti myös käytetty optiikka. Vaikka kameran kenno olisikin pikselimäärältään suuri, niin kaikkia pikseleitä ei pystytä hyödyntämään, mikäli objektiivi ei voi piirtää kohdetta tarkasti. Laadukkaalle objektiiville on ominaista, että sillä pystytään piirtämään tarkka sekä sopivankokoinen vääristymätön kuva kameran ilmaisimelle kuvattavasta kohteesta.

Objektiivit pyritään suunnittelemaan vastaamaan mahdollisimman hyvin sovelluksen käyttötarkoitusta. Laadukas optiikka pystyy piirtämään pistemäisestä kohteesta tulevan valon pienen osaan kennosta, kun taas epäterävälle optiikalle on ominaista valon leviäminen laajemmalle kennon alueelle. Tämä ilmiö on nähtävissä kuvan yksityiskohtien sumenemisena sekä epäterävyytenä.

Käytännön objektiivit koostuvat usean linssin muodostamasta linssisysteemistä. Muodostuneen kuvan, suurennuksen sekä kuvattavan kohteen paikan määrittämiseen linssisysteemi voidaan kuvitella yhdeksi linssiksi, jolla on sama polttoväli kuin itse objektiivilla. Tällöin systeemin suuret ovat laskettavissa Gaussin kuvausyhtälöä hyväksi käyttäen. Kuvassa 4 on esitetty yhden linssin muodostama kuvaussysteemi sekä Gaussin kuvausyhtälön suuret.



Kuva 4. Periaatekuva yhden linssin muodostamasta kuvaussysteemistä

Kyseisen systeemin suureille voidaan käyttää yhtälöä

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}, \quad (1)$$

jossa s' on kuvan etäisyys linssistä, s on kohteen etäisyys linssistä sekä f on polttoväli.

Yhtälöä käytettäessä on muistettava kuvan 4 esittämät merkkisäännöt.

Kuvan 4 suureita käyttämällä voidaan laskea myös kuvan poikittainen suurennus yhtälöllä.

$$m = \frac{h_i}{h_0} = \frac{s'}{s}, \quad (2)$$

jossa h_0 on kohteen korkeus ja h_i on kuvan korkeus.

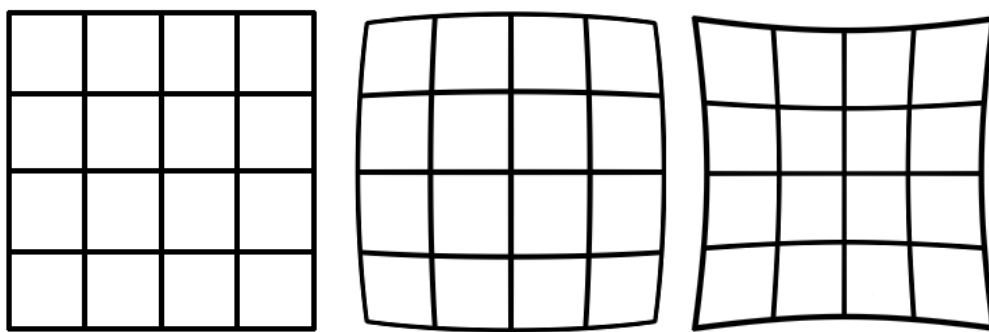
Objektiivin rakenteesta löytyy yleensä myös ns. himmennin, jonka koolla kontrolloidaan valon pääsyä linssisysteemin läpi. Yleensä aukon koko esitetään ns. f-lukuna, joka kuvaa efektiivisen polttovälin sekä tulopupillin suhdetta. Objektiiveissa tämä on esitetty esimerkiksi muodossa 1:1.4 tai f:1.4, jossa 1.4 on f-luku. Aukon kokoa voidaan objektiiveissa yleensä säätää $\sqrt{2}$ -kerrannaisina, mikä tarkoittaa aukkoluvun muuttumista muodossa 1, 1.4 2, 2.8. Aukon ollessa täysin auki aukkoluku on objektiivin f-luku. Aukon koko ei vaikuta pelkästään valotukseen, sillä se myös vaikuttaa mm. syvyysterävyYTEEN. Linssisysteemin ominaisuuksiin kuuluvat myös erilaiset kuvausvirheet, joita käsitellään seuraavassa osiossa tarkemmin. [5, 6.]

2.3.1 Kuvausvirheet

Objektiivin kennolle muodostama kuva ei ole välttämättä geometrisilta mittasuhteitaan tai yksityiskohdiltaan vastaava kuvattun kohteen kanssa. Näitä poikkeamia aiheuttavia virheitä kutsutaan kuvausvirheiksi eli aberraatioiksi. Aberraatiot jaetaan kahteen eri pääryhmään: monokromaattisiin aberraatioihin ja polykromaattisiin aberraatioihin. Polykromaattiset aberraatiot ovat riippuvaisia aallonpituudesta. Monokromaattisia aberraatioita ovat palloaberraatio, koma, astigmatismi sekä kuvapinnan kaarevuus.

Parhaiten aberraatiot korjataan hyvällä linssisuunnittelulla ja huolellisella objektiivin kokoamisella. Monilinssisiä objektiiveja suunniteltaessa tulisi objektiivi aina suunnitella tietylle polttovälille sekä kuvattavan kohteen etäisyydelle, jotta kuvausvirheet olisivat mahdollisimman pieniä. Kuvaustilanteessa virheisiin voidaan vaikuttaa mm. himmentimen suuruudella, jolloin voidaan säätää, kuinka suurta osaa linssistä käytetään hyväksi. Kuvassa esiintyvät geometriset kuvausvirheet korjataan usein matemaattisesti kalibrointitietojen avulla.

Aberraatiot voivat johtua myös objektiivin linssien asennusvirheistä. Ollessaan vinossa tai poiketessaan optiselta akselilta linssi aiheuttaa säteen suuntaista sekä säteen vastaista vääristymää. Vaikka kuva olisikin terävä, voi linssi vääristää kuvaa geometrialtaan. Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva kohteesta, linssin aiheuttamasta tynnyrimäisestä vääristymästä sekä neulatyynymäisestä vääristymästä.



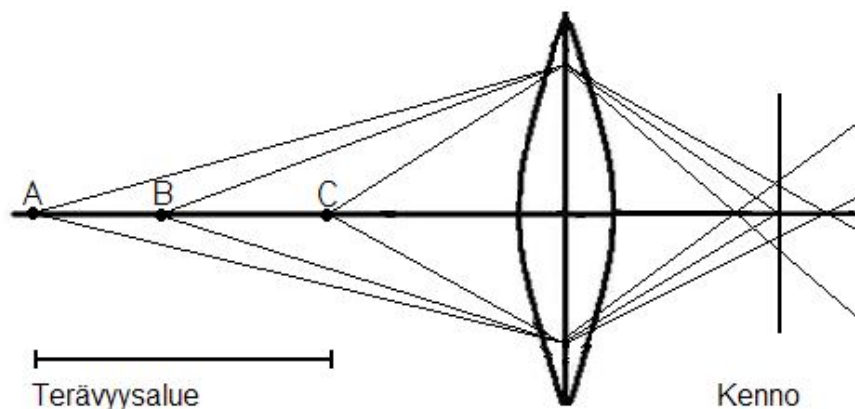
Kuva 5. Geometristen vääristymien vaikutus kuvaan

Ominaista kuvan geometrisille vääristymille on, että kuva voi olla tarkka, mutta kuvan sisältämä informaatio sijaitsee väärässä paikassa. Käytännössä vääristymistä ilmenee erityisesti kuvan reuna-alueilla. Kuvan kohteille suoritettulle mittaukselle vääristymät tuovat mukanaan

mittausepätaarkkuutta, joten kuvaussysteemi tulisi kalibroida, jotta systeemille ominaiset vääristymät saataisiin tietoon. [5, 6.]

2.3.2 Syvyysterävyys

Vaikka kameran objektiivi olisikin kiinteästi kohdistettu tietylle alueelle, niin käytännössä tarkennetun kohdan lähellä olevat kohteet näkyvät myös tarkasti. Tätä aluetta kutsutaan terävyysalueeksi tai syvyysterävyudeksi (DOF, depth of field). Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva syvyysterävyudesta.



Kuva 6. Periaatekuva terävyysalueen muodostumisesta

Kuvasta 6 on nähtävissä, kuinka kennolle kohdasta B muodostuva piste on tarkempi kuin kohteista A ja C. Kohteiden A ja C välimatkaa voidaan kutsua terävyysalueeksi, mikäli kohteista muodostuvaa kuvaa pidetään riittävän terävänä. Terävyysalueeseen vaikuttaa polttoväli, kuvausetäisyys sekä objektiivin aukon koko. Terävyysalue kapenee lähelle tarkennettaessa, mutta toisaalta terävyysaluetta voidaan kasvattaa objektiivin aukkoa pienentämällä. [5, 6.]

2.3.3 Modulaation siirtofunktio

Erotuskyky voidaan käsittää viivataajuudeksi, jossa kaksi samansuuntaista viivaa erottuu toisistaan sekä taustastaan. Erotuskykymittauksiin on kehitetty erilaisia viivatestikuvioita, joissa on pystysuuntaisia sekä vaakasuuntaisia viivaryhmiä. Määritys suoritetaan usein visuaalisesti ja tulos ilmoitetaan yksikössä viivaparia/mm tai paikkataajuutena. Lopputulokseen vaikutta-

via tekijöitä ovat mm. testikuvion malli, viivojen leveyden suhde ja niiden kontrasti sekä kuvausympäristön valaistus. Korkeammille testikuvion paikkataajuuksille siirryttäessä saadaan yhä epätarkempia kuvia teräväreunaisesta kuvattavasta testikuvioista.

Modulaation siirtofunktio kehitettiin kuvaamaan objektiivin tai koko kuvaussysteemin kykyä kuvata kontrastin vaihteluita tietyllä resoluutiolla. MTF-mittauksessa tarkastellaan tarkasti tunnetun intensiteettimuodoltaan sinimuotoisen testikuvion kontrastinvaihteluita kuvion taa-juuden kasvaessa. MTF-mittauksissa harmaasävyprofiilista lasketaan modulaatio yhtälöllä

$$\text{Modulaatio} = \frac{(MAX - MIN)}{(MAX + MIN)}, \quad (3)$$

jossa MAX on harmaasävyprofiilin maksimiarvo ja MIN minimiarvo.

Eri kuvaussysteemejä vertailtaessa voidaan arviointikriteerinä käyttää esimerkiksi jotain tiettyä rajaresoluutiota. Modulaation siirtofunktion etuna on se, että sillä ei pelkästään voida esittää systeemin yksittäisen tekijän ominaisuutta, vaan se kertoo myös koko systeemin hyvyydestä toistaa kontrastia. [1, 2, 5.]

2.4 Kameraliitännät

Konenäkösovelluksissa tarvitaan tietokoneen ja kameran välille liitäntä, jossa kuvainformaatio siirtyy tietokoneen muistiin jatkokäsittelyä varten. Analogiakameroissa paikkariippuvainen tieto muunnetaan aikariippuvaiseksi analogiseksi signaaliksi, jonka jälkeen signaali siirtyy tietokoneen erilliselle kuvankaappauskortille digitoitavaksi. Digitaalikameroissa kuvainformaatio muutetaan digitaaliseen muotoon valmiiksi ennen siirtoa, joten erillistä kuvankaappauskorttia ei välttämättä enää tarvita. Digitaalikamerat hyödyntävät siirtoteinään standardiväyliä, kuten Camera Link, GigE, IEEE 1394 ja USB.

Standardin IEEE 1394 mukainen liitäntä eli tunnetummin Firewire-liitäntä löytyy usein jo valmiina liitännänä tietokoneen emolevyllä. Firewire on sarjamuotoinen siirtoväylä, jonka välityksellä PC sekä siihen kytketyt laitteet viestivät toisilleen. IEEE 1394 -standardin version 1394a siirtonopeus on 400 Mbit/s ja kehittyneemmän version 1394b siirtonopeus voi olla maksimissaan jopa 800 Mbit/s. Liitännän eduiksi nopeuden lisäksi voidaan laskea ns. Plug and Play -ominaisuus, jossa väylä sekä laite tunnistetaan laitteen kytkeytyessä tietokoneeseen.

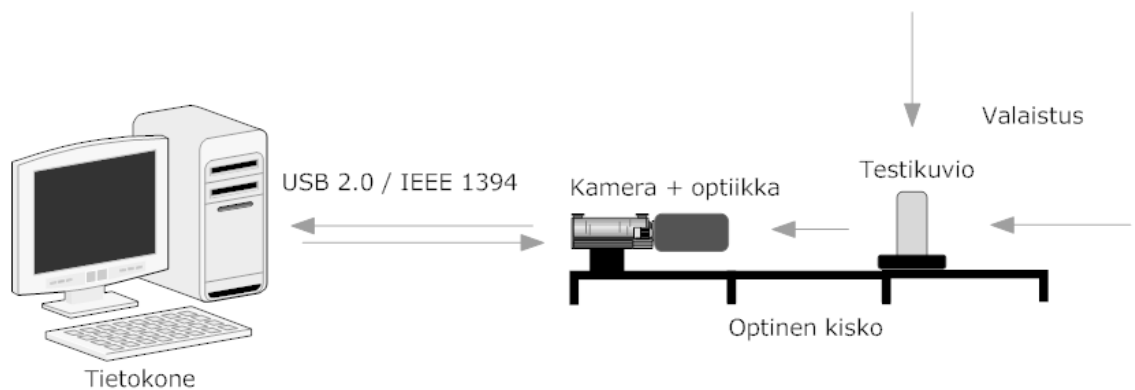
Myös erillisestä virransyötöstä ei välttämättä tarvitse huolehtia, sillä standardin mukaisessa kaapelissa on tiedonsiirron ohella myös liitännät virransyötölle. Firewire-väyläisiin kokenäkökameroihin liittyy spesifikaatio IIDC, jossa on esitelty tarkemmin kameran toimintaa sekä ohjausta kyseisen väylän kautta.

Universal Serial Bus eli tunnetummin USB-liitäntää käytetään yleisesti tietokoneeseen liitettävien laitteiden tiedonsiirrossa. USB-liitännästä on julkaistu versiot 1.x sekä 2.0, joista jälkimmäisen tiedonsiirtonopeus ns. High Speed -tilassa on 480 Mb/s. Firewire-liitännän ohella myös USB-liitäntään kytketty laite ei välttämättä tarvitse erillistä virransyöttöä, vaan kaapelissa kulkee virransyöttö erillisissä johtimissa. Myös väylän konfigurointi sekä liitetyn laitteen tunnistaminen toimii Firewiren kaltaisesti. [2.]

3 TYÖSSÄ KÄYTETTY LAITTEISTO JA OHJELMISTO

3.1 Testilaitteiston rakenne

Mittauslaitteistoon kuuluu tietokone, testiohjelma, IEEE 1394/USB 2.0 -liitännäiset kamerat, valonlähde, optinen kisko sekä testikuvien ja kameroiden pitimet. Mittauslaitteiston periaate on esitetty kuvassa 7.

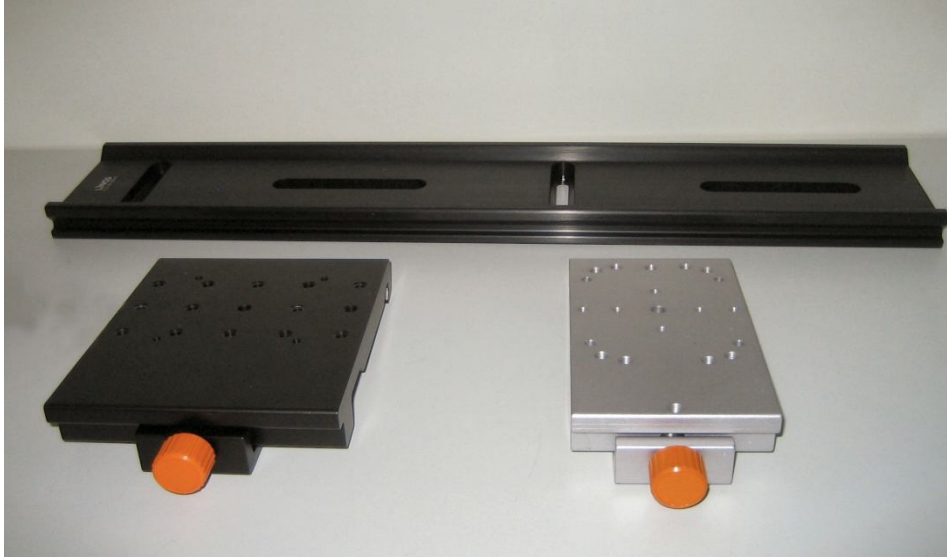


Kuva 7. Työssä käytetty mittauslaitteisto

Testaaminen suoritetaan tietokoneessa olevalla ohjelmalla. Työhön suunniteltu ohjelma ohjaa tietokoneeseen liitettyjä kameroita, kuvaustapahtumia sekä suorittaa otettujen kuvien perusteella laskentaa ja tulostaa näytölle kuvan tai kameras ominaisuutta kuvaavan tuloksen. Valonlähteen tehtävänä on luoda kulloistakin testitapahtumaa varten ihanteellinen valaistus, jotta testikohteesta saataisiin kuva-analyysiä sekä laskentaa varten moitteeton kuva. Kiskon sekä pitimien tehtävänä on pitää kamera sekä testikuviot kohtisuorassa optista akselia vastaan.

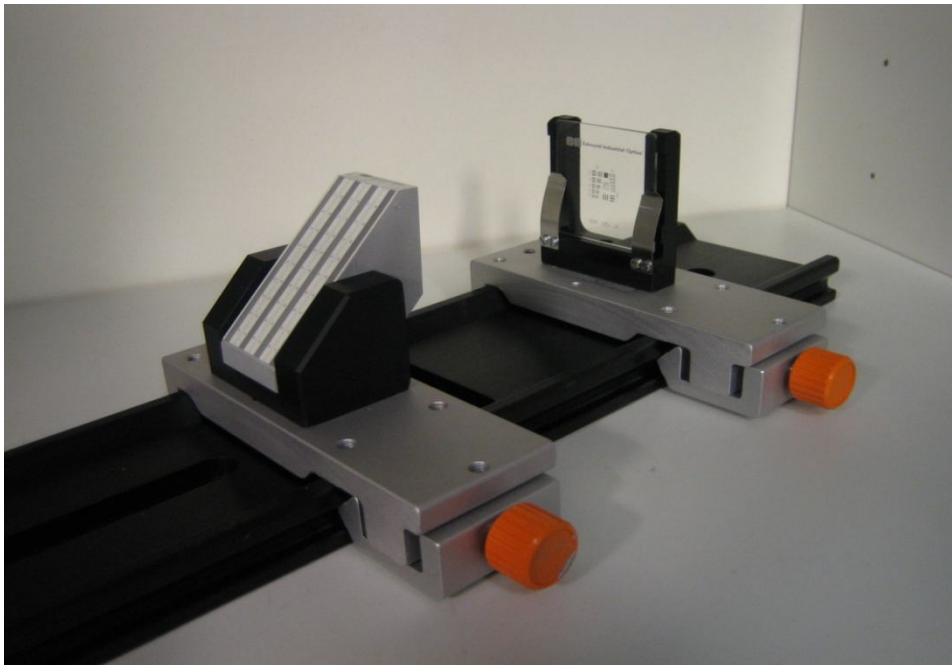
3.2 Kisko ja pitimet

Testilaitteistossa käytettiin Linos Photonicsin valmistamaa optista kiskoja sekä kiskolla kulkevia kelkkoja, joihin kameras ja testikuvien pitimet asennetaan. Kuvassa 8 on esitetty työssä käytetty kisko sekä kiskoon liitettävissä olevat kelkat.



Kuva 8. Työssä käytetty optinen kisko sekä kiskoon liitettävät kelkat

Työtä varten kelkkoihin suunniteltiin kameroille sekä testikuville pitimet. Vaatimuksena oli, että pitimien tuli pitää kamera sekä testikuvio vakaasti paikoillaan sekä kohtisuorassa vasten optista akselia. Kuvassa 9 on esitetty suunnitellut testikuvien pitimet kelkalle sekä kiskolle asennettuna.



Kuva 9. Suunnitellut pitimet kelkkoihin ja kiskoon asennettuna

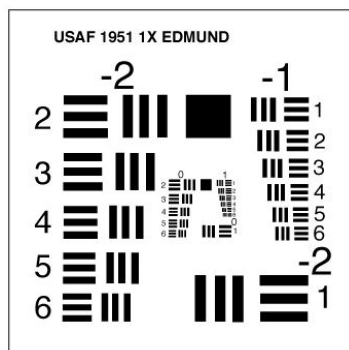
Syvyysterävyyskappaleen pidikkeen kyljessä on pienet ruuvit, jotka pitävät asetetun testikohteen suorassa ja tukevasti paikallaan. Muille testikuville pidike suunniteltiin siten, että USAF-1951, pistekuvio sekä mikrometrilasi voidaan liittää samaan pidikkeeseen.

3.3 Testikuviot

Testikuvia käytetään yleisesti kuvaussysteemin suorituskyvyn arvioimiseen sekä kalibrointiin. Kalibroinnilla ja erinäisillä mittauksilla saadaan tietoa mm. optiikan aiheuttamista vääristymistä. Kun systeemin ominaisuudet tunnetaan, niin niihin voidaan varautua esimerkiksi mitaustarkkuuden parantamiseksi suoritettavalla kalibroinnin ohessa tehdyllä vääristymien korjaamisella. Suorituskykymittauksilla voidaan myös verrata eri systeemejä keskenään sekä valita paras mahdollinen systeemi kuhunkin tarkoitukseen. Yleisesti kuvan laatua sekä systeemin ominaisuuksia testattaessa halutaan selvittää mm. resoluutio, MTF, kontrasti, vääristymät sekä syvyysterävyys. Juuri edellä mainittuja ominaisuuksia pyrittiin tarkastelemaan tässä insinööriyössä. Seuraavissa luvuissa on esitetty työhön valitut testikuviot.

3.3.1 USAF 1951 -testikuvio

USAF 1951 -testikuvioa käytetään mm. kuvaussysteemin resoluution selvittämiseen. Kuvas-
sa 10 on esitetty työssä käytetty testikuvio.



Kuva 10. Työssä käytetty USAF 1951-testikuvio

USAF 1951 -testikuvio koostuu 25 mm x 25 mm alueen sisälle sijoitetuista viivapareista, jotka on organisoitu ryhmiin ja ne taas on jaettu kuuteen elementtiin. Nämä viivaparielementit

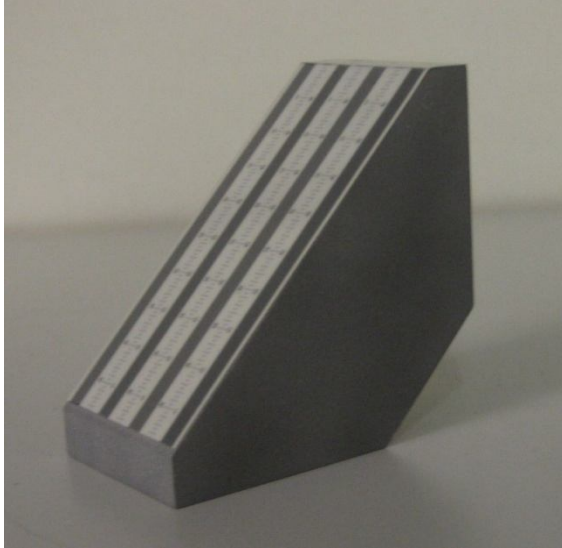
on järjestetty isoimmasta pienimpään standardin määrittelemän kaavan mukaisesti. Jokainen viivaparielementti koostuu kolmesta vaakatasossa olevasta viivasta sekä kolmesta pystytasossa olevasta viivasta. Jokainen ryhmän elementti vastaa tiettyä resoluutiota. Kuvaussysteemin resoluutio määritellään ryhmän elementistä, jonka viivat vielä erottuvat selvästi toisistaan. Analysoitavan kuvan viivapariyhmät, jotka sumenevat tai sulautuvat toisiinsa, eivät enää kuulu systeemin resoluution piiriin. Taulukossa 1 on esitetty USAF 1951 -testikuvion standardin mukaiset resoluutioarvot muodossa viivaparia/mm.

Taulukko 1. USAF 1951 -testikuvion resoluutioarvot

Elementti	Ryhmä -2	Ryhmä -1	Ryhmä 0	Ryhmä 1	Ryhmä 2	Ryhmä 3	Ryhmä 4	Ryhmä 5	Ryhmä 6
1	0,2500	0,5000	1,0000	2,0000	4,0000	8,0000	16,0000	32,0000	64,0000
2	0,2806	0,5612	1,1220	2,2450	4,4900	8,9800	17,9600	35,9200	71,8400
3	0,3150	0,6300	1,2600	2,5200	5,0400	10,0790	20,1600	40,3200	80,6300
4	0,3536	0,7071	1,4140	2,8280	5,6470	11,3140	22,6300	45,2500	90,5100
5	0,3969	0,7937	1,5870	3,1750	6,3500	12,6990	25,4000	50,8000	101,6000
6	0,4454	0,8909	1,7820	3,5640	7,1270	14,2540	28,5100	57,0200	114,0000

3.3.2 Syvyysterävyys

Objektiivi tarkennetaan alueelle, jossa haluttu kohde näkyy kuvassa terävänä. Käytännössä tarkennetusta kohteesta voi kuitenkin olla muita kohteita edempänä tai kauempana, jotka myös kuuluvat terävyyalueeseen. Terävyyalue on riippuvainen tarkennuksesta, aukon koosta sekä tulkitun terävyyden suuruudesta. Kuvassa 11 on esitetty tässä työssä käytetty objekti, jolla syvyysterävyyttä tutkittiin.

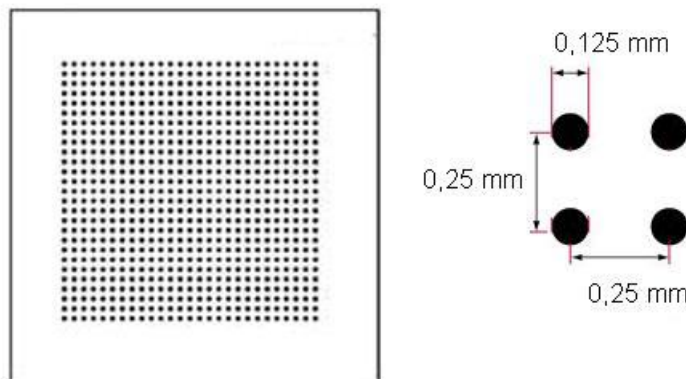


Kuva 11. Syvyysterävyyden määrittämiseen käytetty testikuvio

Kuvan 11 testikuvion fyysiset mitat ovat 57 mm x 34 mm x 57 mm. Kuvio koostuu millimetriasteikosta ja vaakasuunnassa sekä pystysuunnassa olevista viivapareista, joiden tiheys on 5 viivaparia/mm tai 15 viivaparia/mm riippuen asteikosta. Terävyyssalueen tulkinta tapahtuu analysoimalla testikuvioista otetun kuvan viivaparikaistojen pikseliarvoja. Syvyysterävyyden alueella kuvaussysteemi erottaa viivaparikaistat toisistaan, jolloin harmaasävykuvaajasta saadaan esille selviä pikseliarvojen vaihteluita. Syvyysterävyys voidaan tulkita asteikon kohdasta, jossa pikselin harmaasävyarvon modulaation vaihtelu on suurta. Liikuttaessa terävyyssalueen ulkopuolelle, kuva sumenee ja pikselin harmaasävyarvon modulaatio pienenee.

3.3.3 Pistekuvio

Optiikan aiheuttaman kuvan vääristymien tarkastelua varten on kehitetty useita eri testikuvioita. Tässä työssä oltiin kiinnostuneita geometrisista vääristymisistä, joissa optiikan piirtämän kuvan informaatio on väärässä kohtaa todelliseen sijaintiin verrattuna. Kuvassa 12 on esitetty työssä käytetty vääristymien määrittämiseen käytetty testikuvio.

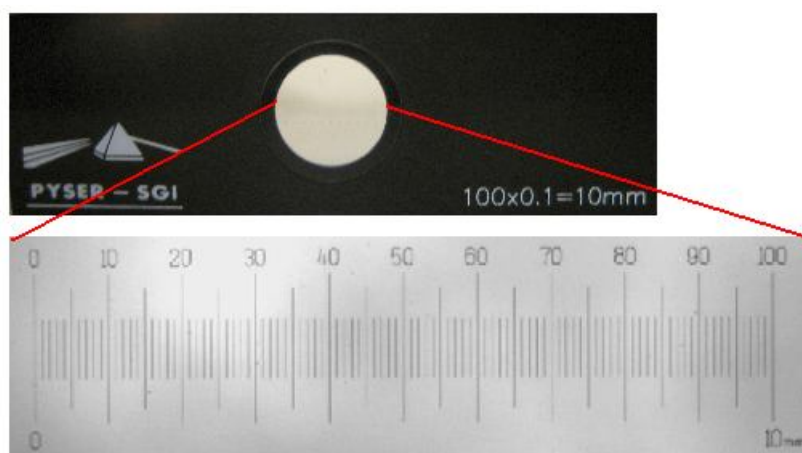


Kuva 12. Kuvausvääristymän määrittämiseen käytetty testikuvio

Testikuvion pisteet on sijoitettu tasavälein 25 mm x 25 mm kattavalle alueelle. Pisteiden halkaisija on 0,125 mm ja pisteiden välinen etäisyys 0,250 mm. Soveltamalla kuva-analyysia ja tarkasti tunnettua kohdetta voidaan optinen vääristymä korjata laskennallisesti otetusta kuvasta.

3.3.4 Mikrometrilasi

Mikrometrilaseja käytetään yleisesti mikroskooppien kalibroinnissa. Kuvassa 13 on esitetty työssä käytetty mikrometrilasi sekä suurennettu kuva sen asteikosta.



Kuva 13. Pikselin koon määrittämiseen käytetty mikrometrilasi

Tässä työssä mikrometrilasia käytettiin pikselin koon määrittämiseen. Käytetyn mikrometrilasin asteikon pituus oli kymmenen millimetriä, joka taas oli jaettu sataan yhtä suureen osaan.

3.4 Testatut kamerat ja optiikat

Insinööriyön testausvaiheeseen valittiin hintaluokaltaan sekä ominaisuuksiltaan suuresti poikkeavat kamerat sekä objektiivit, jotta testauksessa voitaisiin mahdollisesti havaita eroavaisuuksia mittaustuloksissa kameratyypin välillä.

3.4.1 Foculus FO442SB

Foculuksen FO442SB-kamera edustaa hintaluokaltaan testin kalleinta kameraa. Se perustuu CCD-tekniikkaan ja tukee IEEE 1394 -liitäntää. Kuvassa 14 on esitetty testissä käytetty FO442SB-kamera.



Kuva 14. Testattu FO442SB-kamera

Kameran valintaan vaikutti myös LabVIEW-kehitysympäristöön saatavat kameran ohjaukseen tarkoitetut IEEE 1394 -funktiot. Valittu kamera tukee myös IIDC 1394 -spesifikaatiota. Taulukossa 2 on esitetty käytetyn kameran keskeisimmät ominaisuudet.

Taulukko 2. FO442SB-kameran ominaisuuksia

Kuvailmaisin	2/3" CCD-kenno
Resoluutio	1280 x 960 pikseliä
Pikselin koko	(6,45 x 6,45) μ m
Resoluution syvyys	12-bit
Liitäntä	IEEE-1394
Mitat	(44 x 29 x 67) mm
Massa	120 g

3.4.2 uEye1545LE

Testiin valittu uEye1545LE-kamera on testin kameroista hintaluokaltaan halvin. Se perustuu CMOS-tekniikkaan ja tukee USB 2.0 -liitäntää. Kuvassa 15 on esitetty testissä käytetty uEye1545LE-kamera.



Kuva 15. Testattu uEye-1545LE-kamera

Kameran valmistajalta oli mahdollista saada myös kameran ohjaukseen tarvittavat LabVIEW-funktiot, mikä tuki osaltaan kameran valintaa testeihin. Taulukossa 3 on esitetty kameran keskeisimmät ominaisuudet.

Taulukko 3. uEye1545LE-kameran ominaisuuksia

Kuvailmaisin	1/2" CMOS-kenno
Resoluutio	1280 x 1024 pikseliä
Pikselin koko	(5,2 x 5,2) μ m
Resoluution syvyys	8-bit
Liitäntä	USB 2.0
Mitat	(48,40 x 44,00 x 25,40) mm
Massa	35 g

3.5 Käytetyt objektiivit

Ohjelmiston sekä kameroiden testaukseen valittiin objektiiveja kolmelta eri valmistajalta. Objektiivien vaatimuksena oli, että ne sopisivat konenäkökameroiden C-kierteeseen sellaisenaan tai erillisellä sovittimella. Myös polttovälin tuli olla sopiva, jotta suurennus olisi riittävä testikuvion kohteiden kuvaamiseen. Kuvassa 16 on esitetty valitut objektiivit.

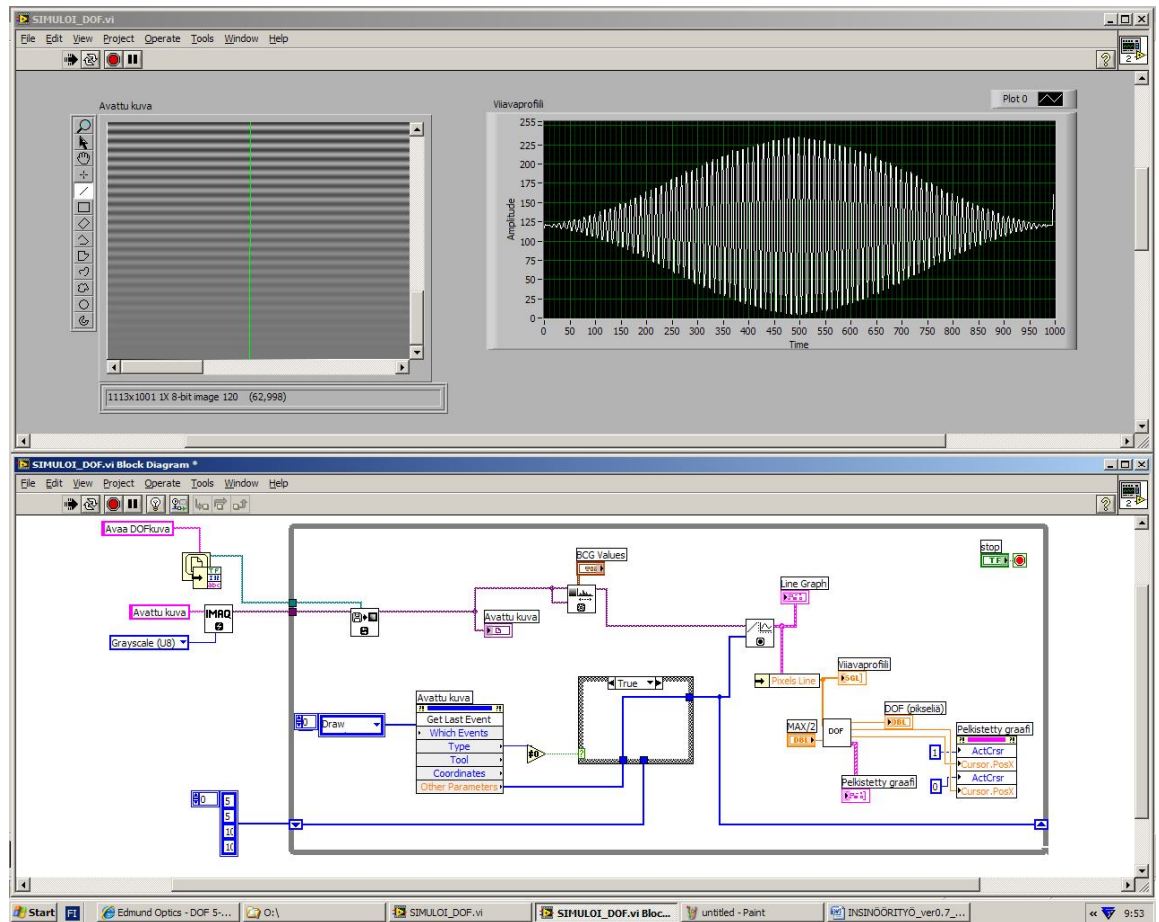


Kuva 16. Schneiderin, Canonin sekä Kowan objektiivit

Objektiiveiksi valittiin Schneiderin, Kowan sekä Canonin objektiivit. Objektiivien polttoväli oli Schneiderin ja Kowan osalta 8 mm ja Canonin polttoväliksi oli ilmoitettu 7,5 mm. Objektiivien valintaan vaikutti myös objektiivin aukon manuaalinen muuttaminen tunnettujen arvojen puitteissa, jolloin mittaustulokset voitiin sijoittaa aukkolukuun.

3.6 Ohjelmistot

Työssä käytettiin National Instrumentsin LabVIEW 7.1 -kehitysympäristöä sekä sen kokenäkö- ja kuva-analyysilaajennusta IMAQ Vision. LabVIEW-ohjelmointiympäristö perustuu graafiseen G-kieleen. Kuvassa 17 on esitetty Labview-kehitysympäristön käyttöpaneeli sekä ohjelman koodia.



Kuva 17. Työssä käytetty LabVIEW-kehitysympäristön käyttöpaneeli sekä ohjelman koodia

LabVIEW on yleinen ja tehokas ohjelma mittaus-, testaus- ja ohjaussovellutuksissa, mutta se soveltuu osin myös muihin tarkoituksiin, kuten esimerkiksi kuva-analyysiin. Ohjelmasta on saatavilla versiot Windows-, Linux- sekä Mac-käyttöjärjestelmille.

4 OHJELMISTON TOTEUTUS

4.1 Ohjelmiston ja käyttöliittymän määrittely

Insinööriyön yksi tärkeimmistä osa-alueista oli suunnitella ja toteuttaa testausohjelma, jonka käyttöliittymän kautta ohjattaisiin kameroita sekä suoritettaisiin erinäisiä testejä. Ohjelman vaatimukset olivat pääpiirteittäin seuraavat:

- Ohjelman tuli olla helppokäyttöinen ja varmatoiminen.
- Ohjelman piti tukea IEEE 1394- ja USB 2.0 -liitännäisiä kameroita.
- Kameran parametreja tuli pystyä säätämään.
- Ohjelman tuli osata suorittaa kuvien perusteella laskentaa.
- Mittaustulokset voi tallettaa tiedostoon esim. taulukkomuodossa.
- Kuvat voisi tallettaa tiedostoon.

Käyttöliittymä sekä ohjelman toiminnot toteutettiin LabVIEW 7.1 -kehitysympäristössä. Kehitysympäristö ei itsessään vielä tarjonnut tukea kaikille edellä mainituille vaatimuksille, joten ohjelmaan tuli liittää seuraavia lisäosia sekä ajureita:

- NI-IMAQ Vision, kuva-analyysifunktiot
- NI-IMAQdx, LabVIEW tuki IEEE 1394- ja GigE-kameroille
- NI-IMAQ USB, tuki yleisille USB-kameroille
- LabVIEW uEyen funktiot
- Käytettävän IEEE 1394 -kameran ajurit.

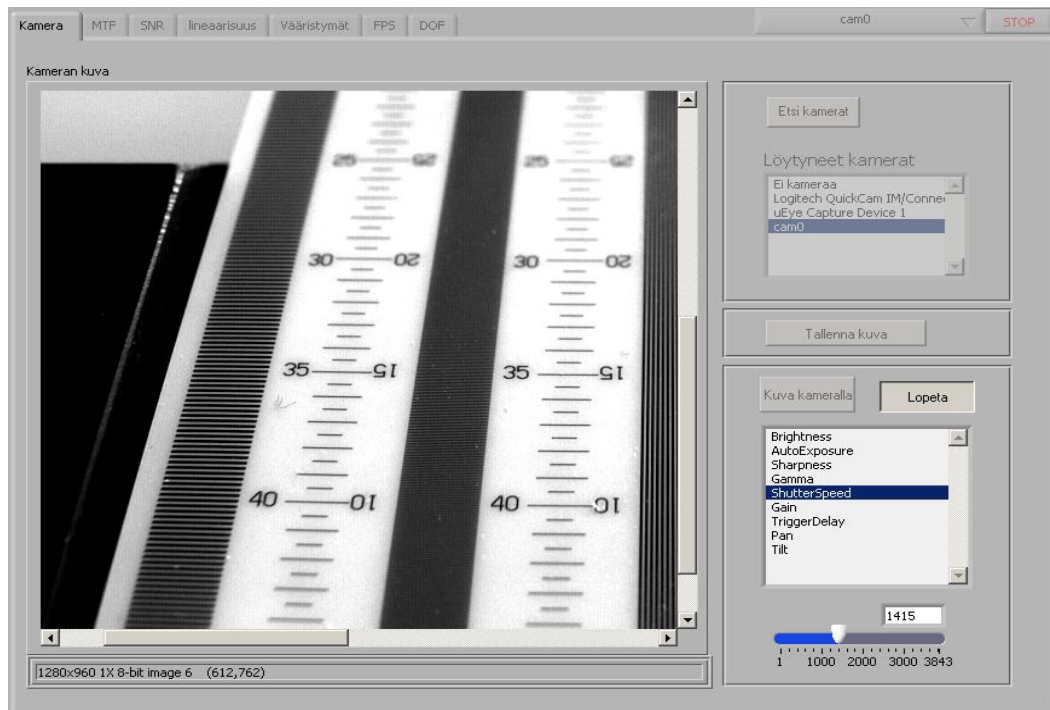
4.2 Ohjelman toteuttaminen

Testausohjelman koodaus toteutettiin testausosa kerrallaan, jonka jälkeen toimivaksi havaittu koodi liitettiin osaksi kokonaisuutta. Käyttöliittymästä toteutettiin seitsemään välilehteen jakautunut käyttöpaneeli. Jokainen välilehden sisältämä toiminta edustaa omaa itsenäistä muista välilehdistä erottuvaa testausmenetelmää. Välilehdet sekä niiden toiminnot on kuvattu seuraavissa luvuissa kuvin sekä vuokaavioilla. Vuokaavioista on huomattava, että niissä on esitetty kyseisen välilehden keskeisimmät toiminnot. Kuvien sekä mittaustulosten tallentamiseen sekä kameran vaihtamiseen liittyvät toiminnot on jätetty vuokaavioista tietoisesti pois.

4.3 Ohjelman välilehdet ja toiminnot

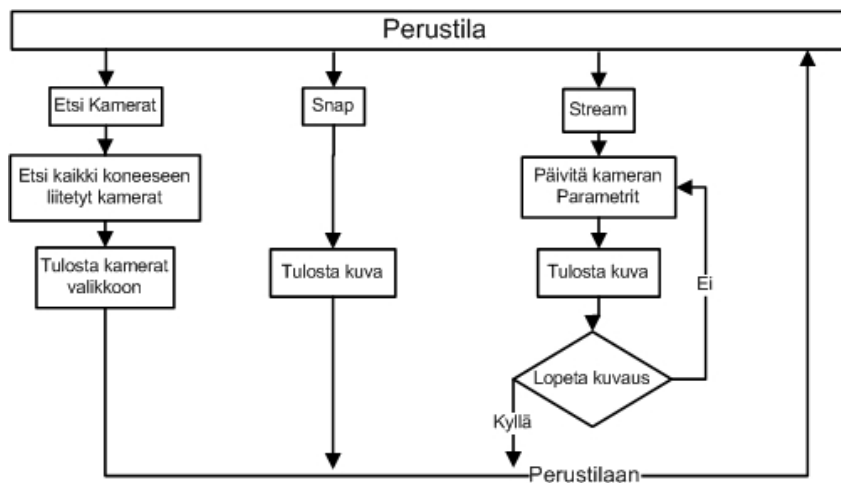
Kamera

Kamera-välilehdessä käyttäjällä on mahdollisuus etsiä koneeseen liitetty USB- ja IEEE 1394-kamerat sekä säätää ohjelmallisesti kameran eri parametreja. Kuvassa 18 on esitetty välilehden keskeisimmät toiminnot.



Kuva 18. Toteutetun ohjelman kamera-välilehti toimintoihin

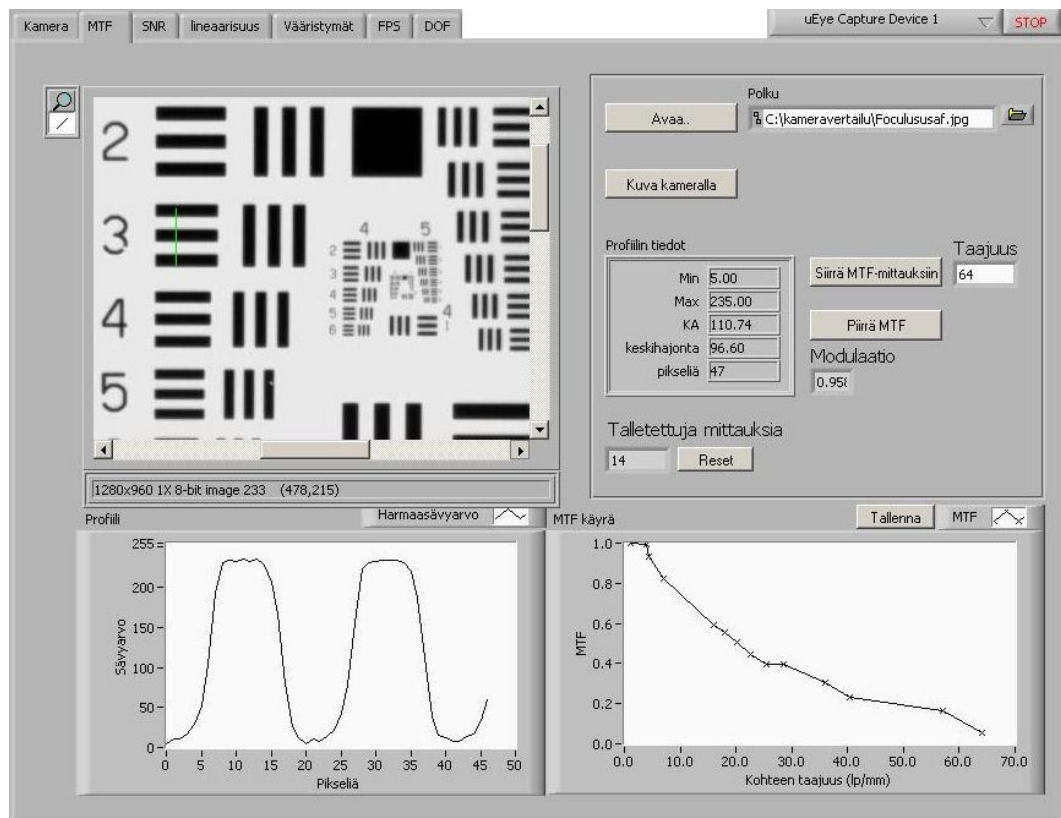
Etsi kamera -toiminto etsii tietokoneeseen liitetty USB/IEEE 1394 -kamerat ja tulostaa löydettyt kamerat oheiseen taulukkoon. Löydettyt kamerat alustetaan myös pikavalikkoon, josta kameroita voidaan valita muillakin välilehdillä. Oikeassa ylänurkassa on myös ohjelman ajon sammuttamiseen tarvittava *STOP*-kytkin. Valitulla kameralla voidaan ottaa yksittäinen kuva tai jatkuvaa kuvaa, jolloin oheisesta valikosta valittuja kameran parametreja voidaan säätää ohjelman ajon aikana alalaidassa olevalla säätimellä. Kuvassa 19 on esitetty *Kamera*-välilehden toiminta pääpiirteittäin lohkokaaviona.



Kuva 19. Kamera-välilehden lohkokaavio

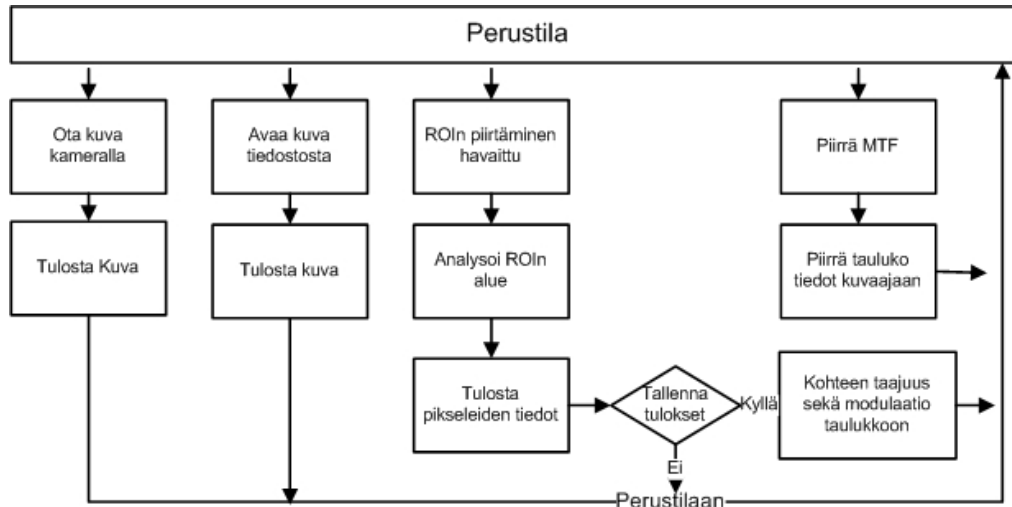
MTF

MTF-välilehdellä käyttäjä voi tarkastella mikrometrin asteikosta kuljettua matkaa pikseleissä tai laskea kuvaussysteemille modulaation siirtofunktion testikuvioista. Kuvassa 20 on esitetty *MTF*-välilehti toimintoiineen.



Kuva 20. Toteutetun ohjelman MTF-välilehti toimintoiineen

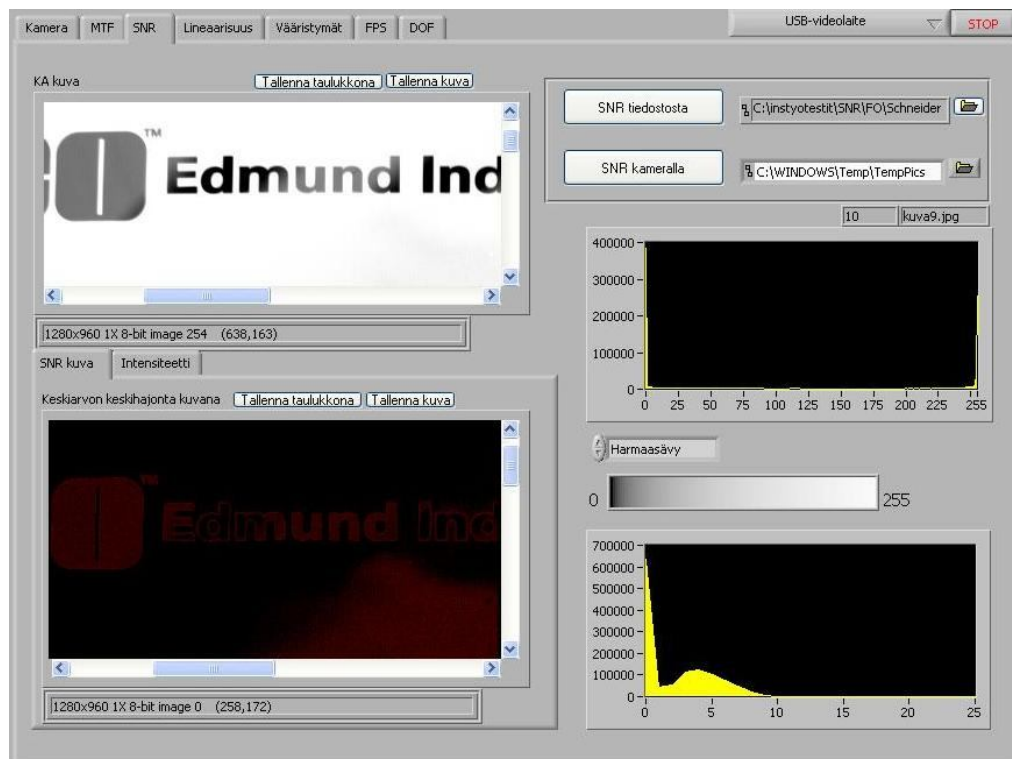
Käyttäjä voi avata valmiin kuvan tiedostosta tai ottaa uuden kuvan valitulla kameralla. Tämän jälkeen on mahdollisuus määrittää kuvaan suora viiva, jonka alle jääneet kuvapikseleiden arvot menevät automaattisesti analyysiin. Analyysistä saadun harmaasävyprofiiliin lisäksi käyttäjälle tulostetaan mm. profiilin min/max-arvot, keskiarvo, kuljettu matka pikseleinä sekä modulaatio. Käyttäjä voi halutessaan syöttää tunnetun kohteen taajuuden ohjelmaan ja tallentaa mittaustulokset myöhempää käyttöä varten. Käyttäjän tallettaessa useita näytteitä voidaan lopulta tulostaa modulaation siirtofunktiota kuvaava käyrä. Kuvassa 21 on esitetty *MTF*-välilehden toiminnot lohkokaaavana.



Kuva 21. MTF-välilehden lohkokaavio

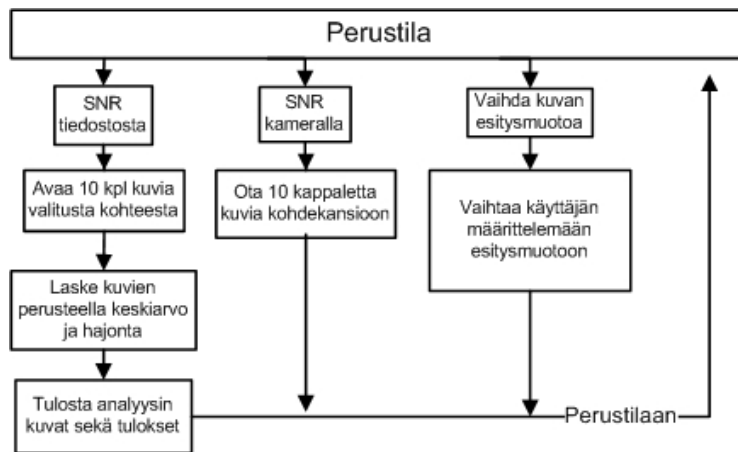
SNR

SNR-välilehdellä voidaan tarkastella kuvissa esiintyvää kohinaa. Kuvassa 22 on esitetty SNR-välilehti sekä sen toimintoja ohjaavat painikkeet.



Kuva 22. Toteutetun ohjelman SNR-välilehti toimintoiheen

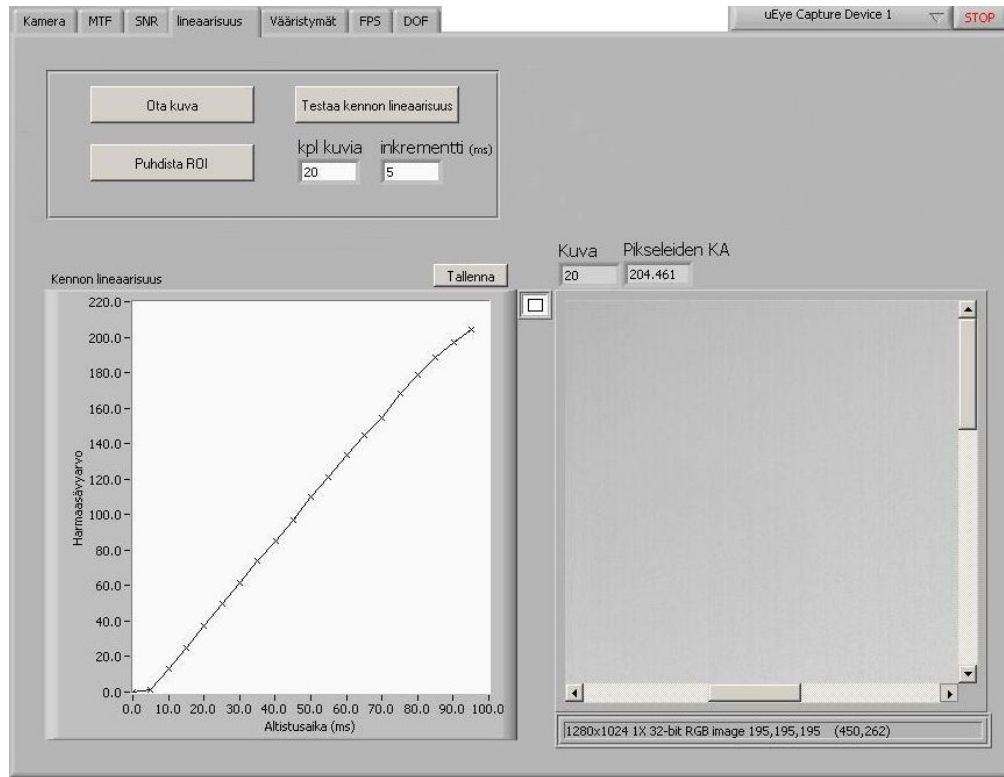
SNR-välilehdellä käyttäjä voi suorittaa *SNR*-analyysin tiedostossa valmiina oleville kuville tai suorittaa analyysin valitulla kameralla. Prosessin aikana käyttäjälle tulostetaan analysoitava kuva sekä sen histogrammi, jossa on nähtävissä kuvan kaikkien pikseliarvojen jakauma. Lopuksi käyttäjälle tulostetaan prosessoitujen kuvien keskiarvo sekä keskihajonta kuvina sekä kuvien histogrammit. Käyttäjä voi muuttaa halutessaan kuvien esitystapaa, jolloin erityisesti pienen kuvakohinan tapauksessa pienetkin kuvapikselin arvot on kuvassa silmin nähtävissä. Kuvassa 23 on esitetty *SNR*-välilehden toiminnot pääpiirteittäin lohkokaaviona.



Kuva 23. *SNR*-välilehden toiminnot lohkokaaviona

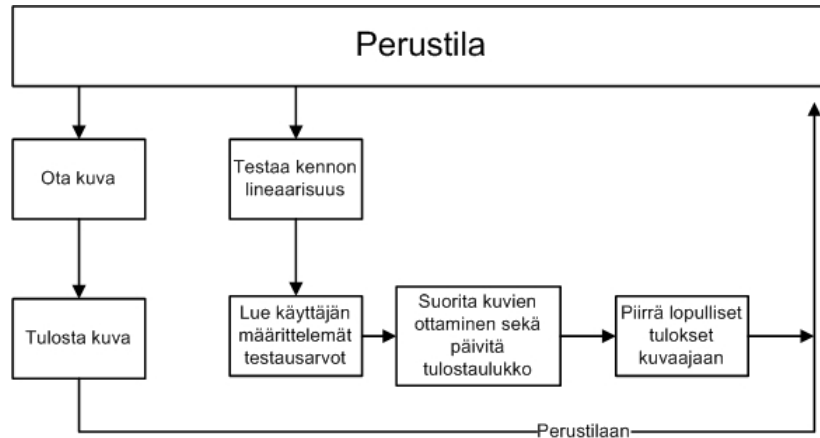
Lineaarisuus

Lineaarisuus-välilehdellä tarkastellaan kennon kykyä vastata lineaarisesti kasvavaan kennon altistusaikaan. Kuvassa 24 on esitetty *lineaarisuus*-välilehden toiminnot.



Kuva 24. Toteutetun ohjelman lineaarisuus-välilehti toimintoiineen

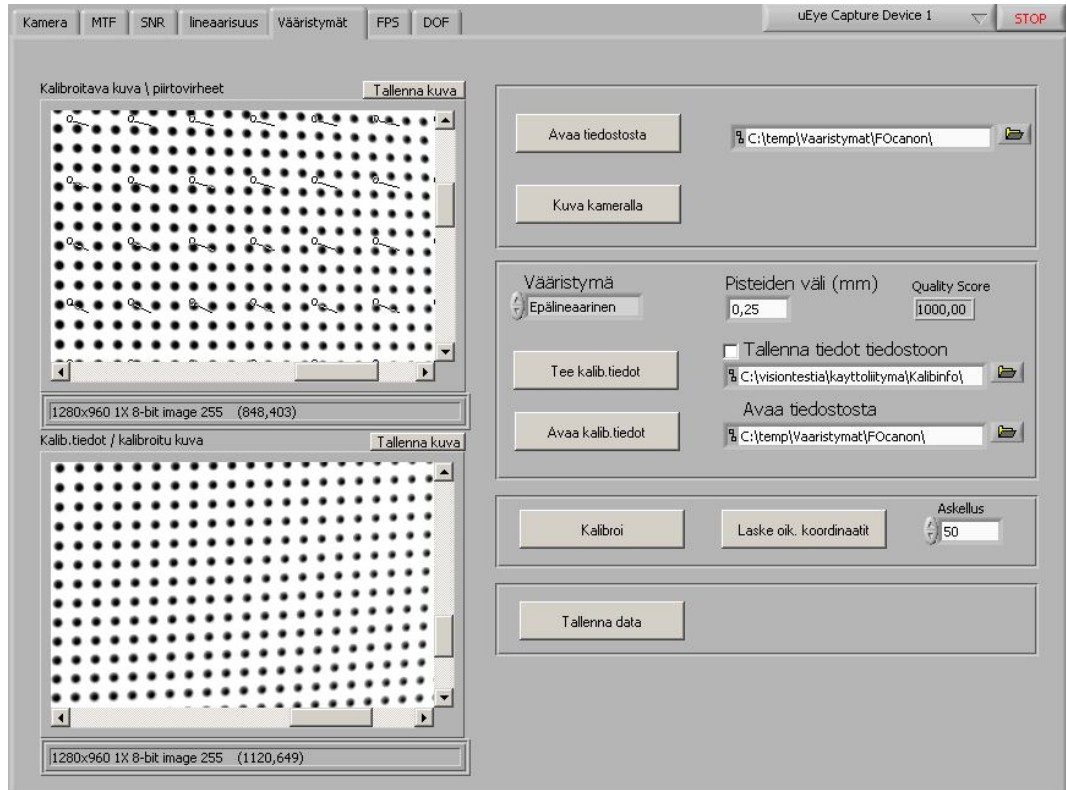
Välilehdellä käyttäjä voi asettaa ohjelmalle otettavien kuvien määrän sekä kamerasulkimen inkrementin. Analyysi toteutetaan oletusarvoisesti koko kuvalle, mutta käyttäjä voi vaihtoehtoisesti määrittää prosessille ROI:n, jonka sisältämien pikseleiden arvoista vaste lasketaan. Analyysin lähtönä saadaan tuloksen kuvaaja, jossa on esitetty kuvan pikseleiden keskiarvojen vaste kennon altistusaikaan nähden. Käyttäjällä voi tallettaa myös saadut tulokset taulukkoon myöhempää käsittelyä varten. Kuvassa 25 on esitetty lineaarisuus-välilehden toiminta lohkokaaviona.



Kuva 25. Lineaarisuus-välilehden toiminnot lohkokaaviona

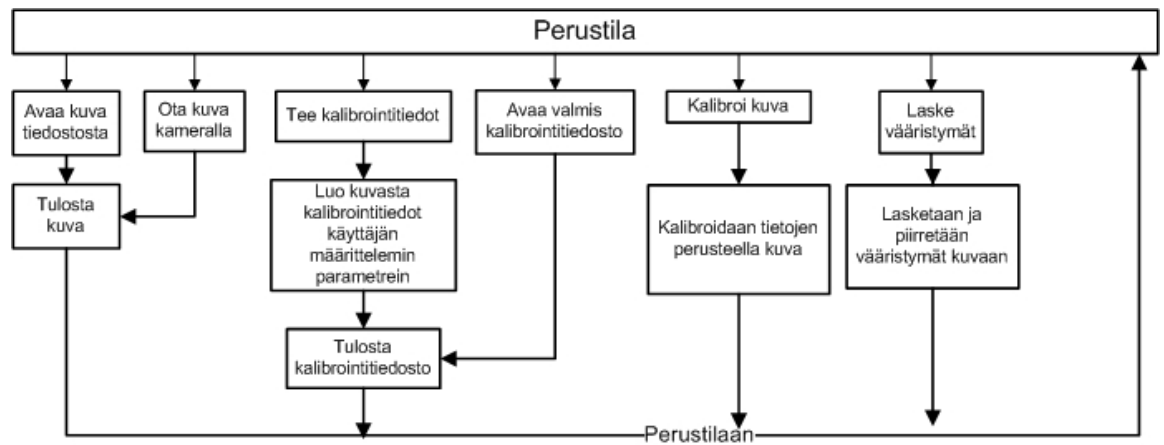
Vääristymät

Vääristymät-välilehdellä käyttäjä voi kalibroida käytettävän kuvaussysteemin sekä piirtää kuvaan optiikan aiheuttamat vääristymät. *Vääristymät*-välilehti koostuu useasta toisistaan riippuvista toiminnoista. Kuvassa 26 on esitetty *Vääristymät*-välilehti sekä sen toiminnot.



Kuva 26. Toteutetun ohjelman vääristymät-välilehti

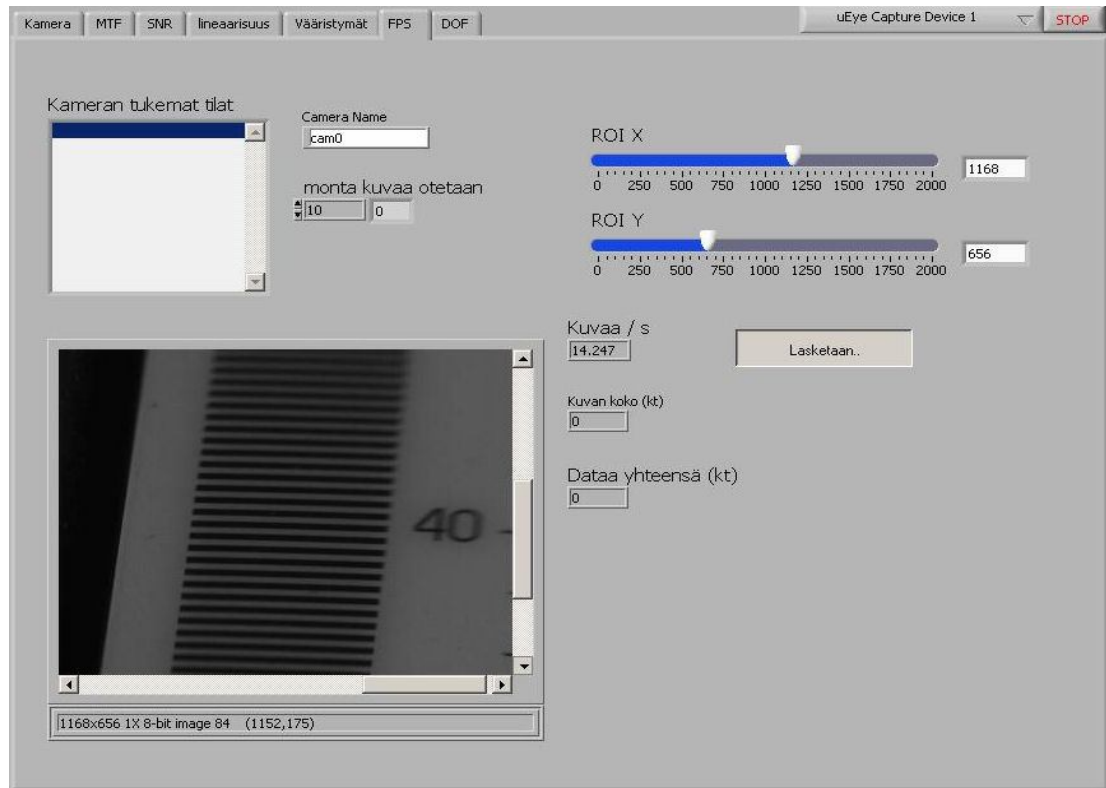
Käyttäjän on aluksi määriteltävä kalibroitava kuva joko avaamalla se tiedostosta tai ottamalla valitulla kameralla kuva pistekuviosta. Tämän jälkeen voidaan avata jo valmiit kalibroititiedot tai tehdä ne syöttämällä ohjelmalle oletetun vääristymän sekä kuvan pisteiden tiedot. Kalibroititietojen laskeminen ja luonti voi viedä koneelta useita sekunteja. Lopuksi avattu kuva voidaan kalibroida käyttäen luotuja kalibroititietoja, jolloin kuvalle voidaan tehdä tarkempia mittauksia. Tietojen avulla voidaan myös piirtää vääristyneen kuvapisteen sekä todellisen kuvapisteen välille suora, joka kuvaa optiikan aiheuttamaa vääristymän suuntaa. Piirrettyjen viivojen tiheyteen kuvassa käyttäjä voi vaikuttaa askellusparametrilla. Piirrettyjen viivojen data voidaan tallentaa erilliseen taulukkoon myöhempää käyttöä varten. Kuvassa 27 on esitetty *vääristymät*-välilehden toiminnot lohkokaaaviona.



Kuva 27. Vääristymä-välilehden toiminnot lohkokaaaviona

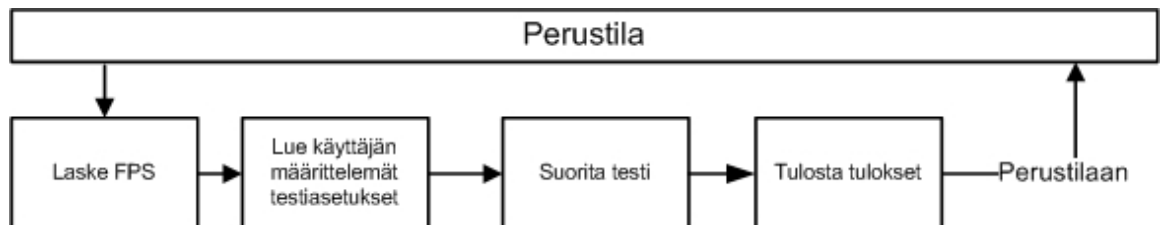
FPS

FPS-välilehdellä tarkastellaan kameralle määritellyn kuvankoon vaikutusta kuvausnopeuteen. Kuvassa 28 on esitetty *FPS*-välilehti sekä sen sisältämät toiminnot.



Kuva 28. Toteutetun ohjelman FPS-välilehti

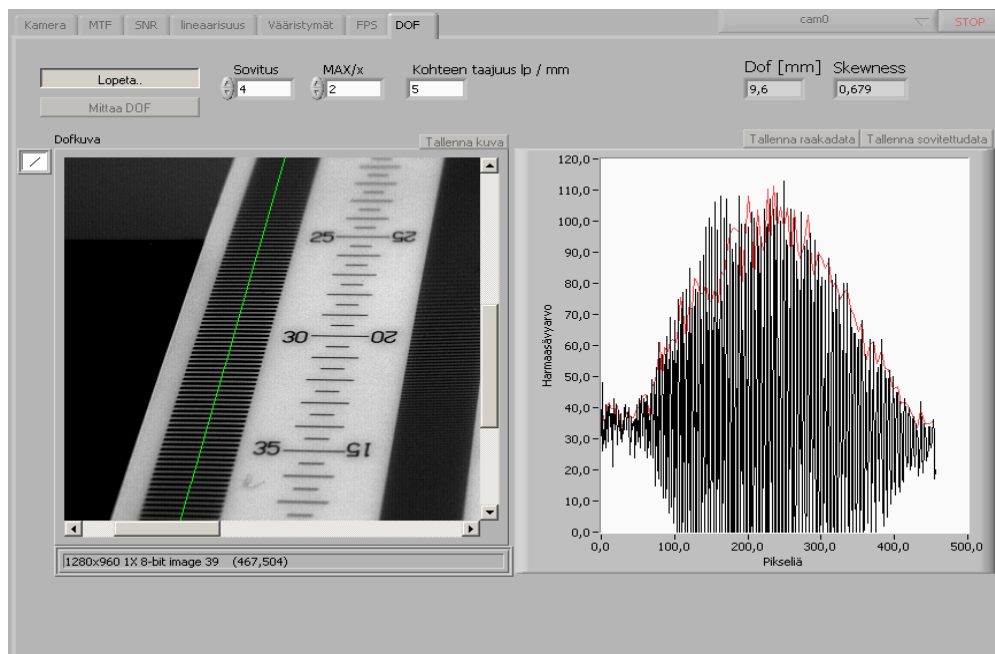
FPS-välilehdellä käyttäjä voi asettaa kuvan X- ja Y -parametrit sekä otettavien kuvien määrän. IEEE 1394 -liitännäisten kameroiden valmiit tuetut tilat nopeuksineen saadaan esille erilliseen valikkoon. USB-kameroissa tämä ominaisuus ei ole tuettu. IIDC-spesifikaation perustuvat IEEE 1394 -kamerat mahdollistavat kuvan koon asettaessa kamera mode7-tilaan. Kuvassa 29 on esitetty *FPS*-välilehden toiminnot lohkokaaviona.



Kuva 29. FPS-välilehden toiminnot lohkokaaviona

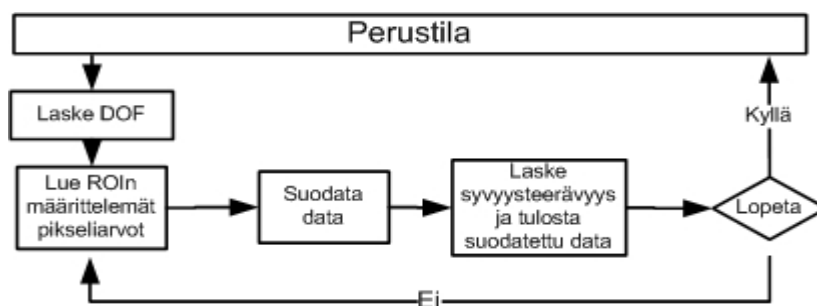
DOF

DOF-välilehdellä voidaan tarkastella kuvaussysteemin syvyysterävyyttä kuvaamalla testikohdetta sekä analysoimalla viivaprofiilin tietoja. Kuvassa 30 on esitetty *DOF*-välilehden toiminnot.



Kuva 30. Toteutetun DOF-välilehti

DOF-välilehdellä käyttäjällä on mahdollista kuvata jatkuva-aikaisesti valitsemallaan kameralla testikohdetta. Käyttäjän tulee etsiä testikohteen kuvasta mielekäs viivapariikaista, jossa syvyysterävyys on nähtävissä. Viivapariikaistan yli voi määrittää viivalla ROI:n, jonka pikseliarvot lähtevät automaattisesti analyysiin. Analyysin tuloksena on alkuperäinen harmaasävyprofiili sekä profiilista suodatettu data. Lähtönä saadaan myös suodatetusta profiilista laskettu syvyysterävyyden arvo. Kuvassa 31 on esitetty lohkokaavio *DOF*-analyysistä.



Kuva 31. DOF-välilehden toiminnot vuokaaviona

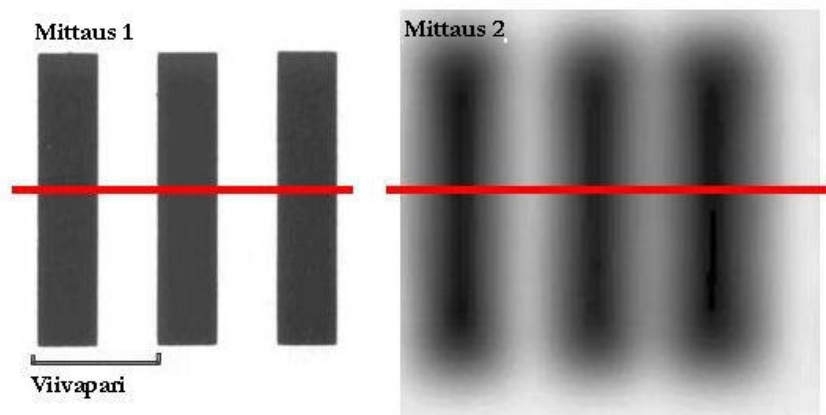
5 TESTAUSMENETELMÄT

5.1 Testauksen tavoite

Testausmenetelmillä pyrittiin arvioimaan käytettävien kameroiden sekä optiikan ominaisuuksia. Kameroiden sekä niihin liittyvän optiikan vertailussa ollaan kiinnostuneita mm. erottelukyvystä, kuvausnopeudesta, syvyysterävyydestä sekä mahdollisista optiikan aiheuttamista vääristymistä. Seuraavissa luvuissa on käsitelty tarkemmin johdannossa esitetyn teorian pohjalta johdettuja testausmenetelmiä sekä laskentaa niiden taustalla.

5.2 Modulaation siirtofunktio

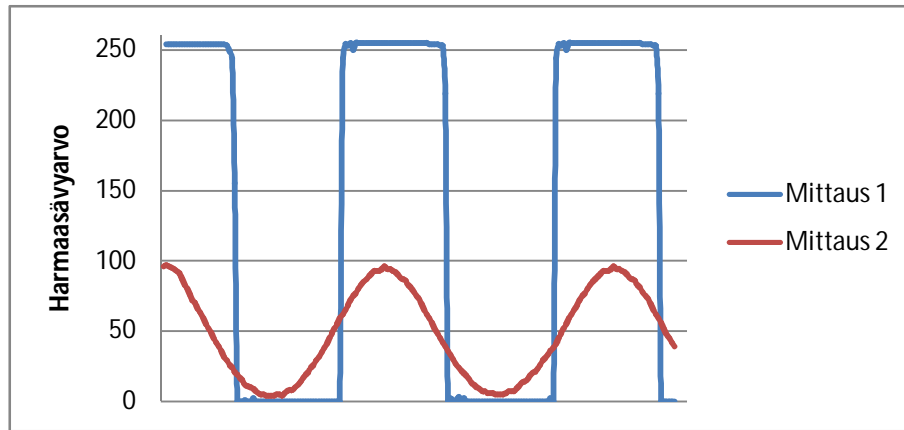
Esitetyn teorian mukaisesti ottamalla kuvia tarkoin tunnetusta teräväreunaisesta kohteesta sekä kuvaa analysoimalla voidaan kuvaussysteemille määrittää MTF-kuvaaja, joka esittää systeemin kykyä toistaa pieniä yksityiskohtia. Kuvassa 32 on esitetty kuvat kahdesta eri viivaparielementistä eri paikkataajuudella.



Kuva 32. Viivaparielementit eri paikkataajuudella

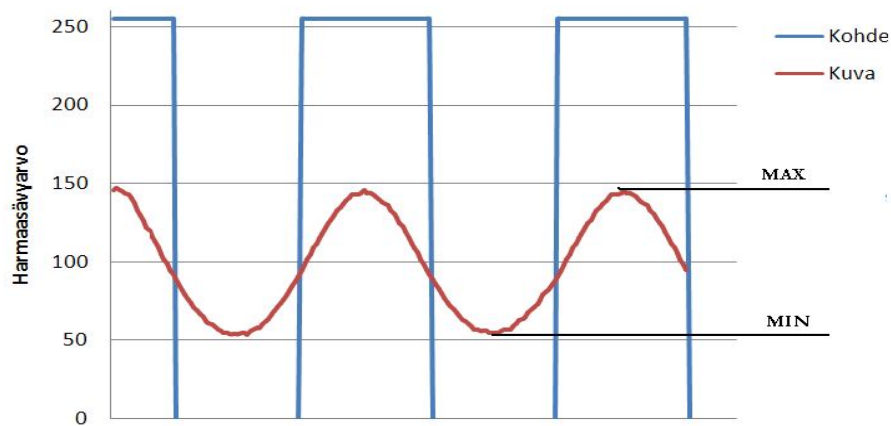
Soveltamalla kuva-analyysiä voidaan kuvasta tarkastella tietyn ROI:n alle jääneitä kuvapikselien harmaasävyarvoja, jotka voivat vaihdella 8-bittisessä kuvassa mustasta (0) aina valkoiseen (255). Esittämällä saadut harmaasävyarvot taulukkomuodossa saadaan kuvan kohteen

ns. harmaasävyprofiili. Kuvassa 33 on esitetty kuvan 32 kohteiden mittauksista 1 sekä 2 saadut harmaasävyprofiilit.



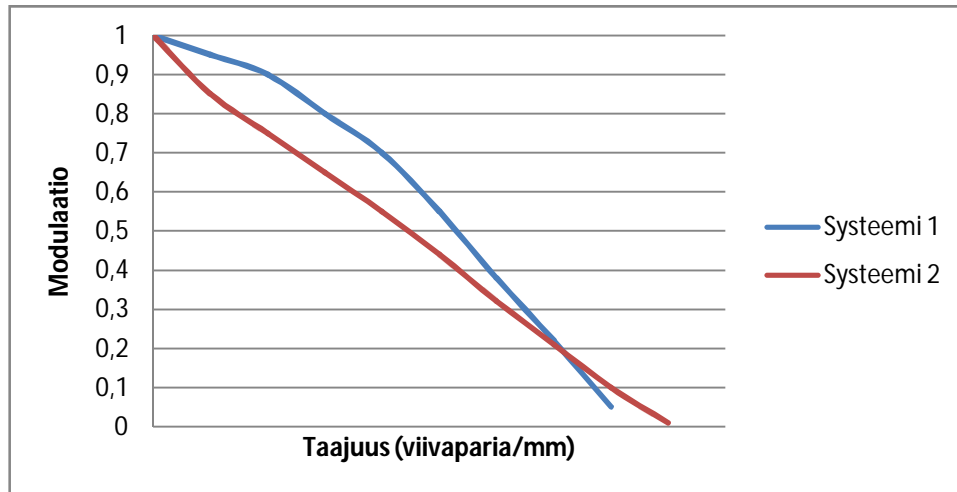
Kuva 33. Kahdesta eri mittaustilanteesta saatu harmaasävyprofiili

Tarkasteltaessa saman kuvaussysteemin ottamia kuvia viivaparielementeistä yhä kasvavilla paikkataajuuksilla, soveltamalla kuva-analyysiä ja kiinnittämällä huomiota kuvan sekä tunnetun kohteen modulaatioon, voidaan kyseiselle kuvaussysteemille määrittää modulaation siirtofunktio. Kuvassa 34 on esitetty periaatekuva tunnetun kohteen sekä kohteen kuvan mahdollisesta modulaatiosta.



Kuva 34. Testikohteen sekä testikohteesta saadun kuvan modulaatio

Otettaessa testikuvista useita näytteitä ja suoritettaessa näytteille useita analyysejä voidaan tulokset esittää kuvaajana, jossa y-akselilla on esitetty laskettu modulaation arvo sekä x-akselilla kohteen taajuus, joka ennalta tiedetään. Kuvassa 35 on esitetty kahden eri systeemin mahdollinen MTF-kuvaja.

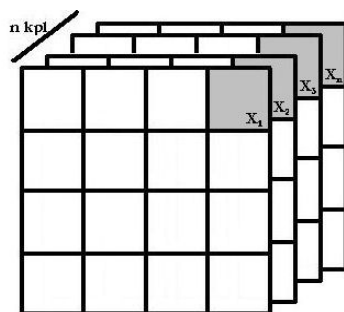


Kuva 35. Periaatekuva kahden eri kuvaussysteemin MTF-kuvaajasta

Kuvasta 35 on nähtävissä, että modulaatio muuttuu spatiaalisen taajuuden funktiona ja että taajuuden kasvaessa modulaatio pienenee. Silmämääräisesti arvioituna voidaan systeemin 1 erottelukykä pitää parempana, sillä se säilyttää kohteen kontrastin parempana kauemmin mentäessä yhä suuremmille taajuuksille.[1, 9, 10.]

5.3 Signaalikohinasuhde

Työssä oltiin kiinnostuneita itse kohinasta kuvassa. Käsittelemällä kuvasarjoja pikselikohtaisesti sekä soveltamalla teoriaa voidaan kuvalla esittää pelkästään kuvaustilanteessa ilmenevä kohina. Keskimääräinen kohina saadaan esille laskemalla tietyn kuvasarjan pikseliarvojen pikselikohtainen keskiarvo, minkä jälkeen kuvasarjan sekä lasketun keskiarvon perusteella lasketaan keskihajonta. Kuvassa 36 on esitetty periaatekuva laskemisesta.



Kuva 36. Signaalikohinasuhteen laskeminen kuvien pikseleistä

Laskemiseen käytetään yhtälöitä (4) ja (5).

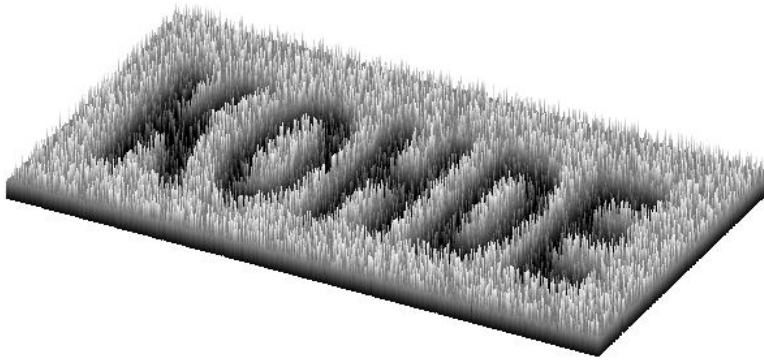
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}, \quad (4)$$

jossa \bar{X} on keskiarvo, n on otoksien määrä sekä X_i pikseliarvo.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

jossa s on keskihajonta, \bar{X} keskiarvo, n otoksien määrä sekä X_i pikseliarvo.

Kuvassa 37 on esitetty kärjistetty periaatekuva lopputulokseksi saadusta kuvasarjan analyysistä.

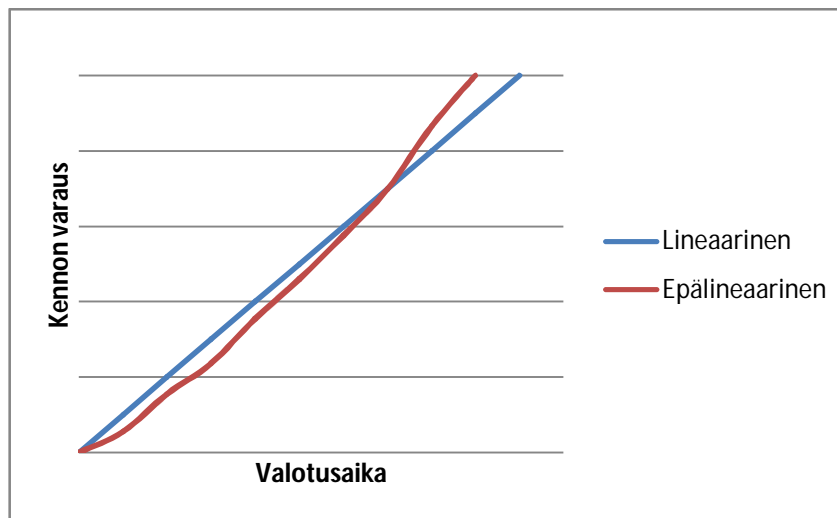


Kuva 37. Periaatekuva analyysin tuloksesta

Periaatekuvan 37 pikseliarvot edustavat poikkeamaa kuvasarjan keskiarvosta ja samalla kuvasarjan keskimääräistä kohinaa. Mikäli kuvasarjan pikseleissä ei esiinny poikkeamia tai suurta satunnaista kohinaa, niin kuvan pikseleiden arvot ovat lähellä nollaa, mikä näkyy harmaasävykuvassa mustana. Periaatekuvasta 37 voi esimerkiksi päätellä, että kuvattavan kohteen ympäristössä esiintyy runsaasti kohinaa. Myös kohteen pinnalla on havaittavissa paikka paikoin pikseliarvon muutoksia. Tässä työssä kuvasarjan pituudeksi oli määritetty kymmenen kuvaa. [1, 2.]

5.4 Kennon lineaarisuus

Digitaalisen kameran kennon vaste riippuu tulevan valon määrästä sekä kennon pikselin herkkyydestä. Tarkasteltaessa kennon lineaarisuutta myös pikselin ns. dynamiikka eli kyky vastata varauksella yhä suurempaan valomäärään ilman saturaatiota vaikuttaa lopputulokseen. Kun pikseli saavuttaa suurimman mahdollisen varauksen eli saturaation, niin kasvavan valon muutosta ei enää kennolla pystytä havaitsemaan. CCD-kennolla voi myös tapahtua varauksen ylivuotoa naapuripikseliin, mikäli varauksen ylivuotoa ei ole huomioitu kennon rakenteessa. Kuvassa 38 on esitetty periaatekuva mahdollisesta mittauksesta, jossa on esitetty täysin lineaarinen sekä lineaarisuudesta hieman poikkeava vaste valotusaikaan nähden.



Kuva 38. Periaatekuva kennon vasteesta valotusajan funktiona

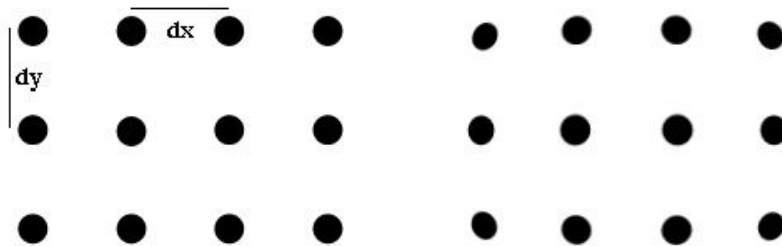
Työhön toteutettu sovellus testaa kennon herkkyyttä sekä lineaarisuutta valolle analysoimalla otetun kuvan tai ROI:n määrittelemän alan pikseliarvojen keskiarvon verrattuna kuvan ottamiseen käytettyyn kameran sulkimen aikaan. Keskiarvon laskemiseen käytetään aiemmin esitettyä yhtälöä (4).

Testausprosessissa käyttäjän tulee määrittää kuvasarjan pituus sekä kameran sulkimen inkrementtiarvo millisekunneina. Tämän jälkeen suoritetaan kuvasarjan ottaminen, minkä ohessa lasketaan kulloisenkin kuvan pikseleiden keskiarvo sekä talletetaan saatu tulos sekä vastaava suljinaika taulukkoon myöhempää käyttöä varten. Lopuksi tulostetaan kuvasarjan perusteella laadittu kuvaaja, joka on periaatekuvan 38 kaltainen. Testauksessa kamera ei välttämättä tarvitse ollenkaan objektiivia, vaan testaus voidaan suorittaa paljaalle kennolle. Kennon edessä

voi olla esimerkiksi valkoinen paperi sirottamassa valoa tasaisesti. Testausympäristössä on myös kiinnitettävä huomiota tasaiseen ja vakaaseen valaistukseen. [1.]

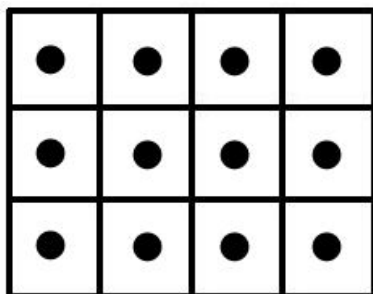
5.5 Vääristymien määrittäminen

Tässä työssä kuvan korjaus suoritetaan laskennallisesti kalibrointitietojen avulla. NI IMAQ Visionin laajennus LabVIEW-kehitysympäristöön tarjoaa IMAQ Learn Calibration Template -funktion, jonka algoritmi on optimoitu suorittamaan kalibrointi tarkasti tunnetusta pisteistä koostuvasta kohteesta. Kuvassa 39 on esitetty periaatekuva kohteesta sekä siitä otettu kuva, jossa esiintyy tynnyrimäistä vääristymää.



Kuva 39. Pistekuvio vasemmalla sekä oikealla kuvassa esiintyvä vääristymä

Kalibrointifunktio saa syötteenä kuvan pistekuviosta sekä tunnetut keskipisteiden välit dx ja dy . Tämän jälkeen funktio kartoittaa tietojen perusteella jokaiselle tunnistetulle pisteelle suorakaiteen muotoisen alueen, jonka jälkeen funktio arvioi todellisten kuvapisteen sijainnin jokaisen suorakaiteen sisällä perustuen annettuihin tietoihin ja löydettyihin pisteisiin. Kuvassa 40 on esitetty funktion tapa kartoittaa alue löydettyjen pisteiden ympärillä.

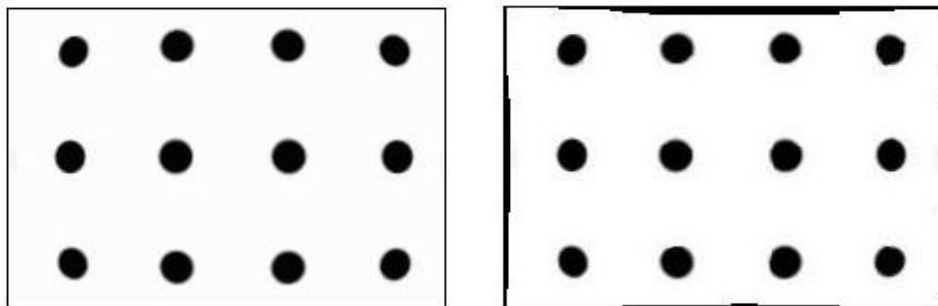


Kuva 40. Kartoitettu alue kuvasta löydettyjen pisteiden ympärillä

Kalibrointifunktion luonteen vuoksi on huomattava, että avainasemassa on funktioon syötetty kuva. Mikäli kuvan pisteiden sekä taustan välillä ei ole riittävästi kontrastieroa, voi kynnnyksessä osa pisteistä lukeutua taustaan, mikä osaltaan nostaa kalibroinnin epätarkkuutta.

Kalibrointifunktion lähtönä saadaan kuvaussysteemin kalibrointitiedot sekä numeerinen arvo väliltä 0–1000 kalibroinnin onnistumisesta. Arvo ei kuvaa kalibroinnin tarkkuutta, vaan syötteenä saadun kuvan mielekkyyttä kynnystämisen sekä pisteiden kartoittamisen kannalta. Kalibrointitiedot pitävät sisällään kaikki kuvan korjaukseen tarvittavat tiedot, kuten todellisten pikseleiden paikat, kalibroinnissa syntyneen mahdollisen virheen pikselikohtaisesti taulukoituna sekä kalibrointiin käytetyt syöttötiedot. Kalibrointitiedot on sinällään suljettu tiedosto, jonka sisältöä pääsee hyödyntämään IMAQ Visionin funktioilla. Tässä työssä hyödynnettiin mm. vääristymien ilmaisemista kuvassa kysymällä kuvakoordinaattia vastaavat oikeat koordinaatit kalibrointitiedostosta.

Kuvan korjaaminen tapahtuu hyödyntämällä kalibrointitietojen sisältämää korjaustaulukkoa, joka korjaa kuvakoordinaatit vastaamaan todellista paikkaa. Kuvassa 41 on esitetty periaatekuva vääristyneestä kuvasta sekä kalibrointitietojen avulla korjattu kuva.

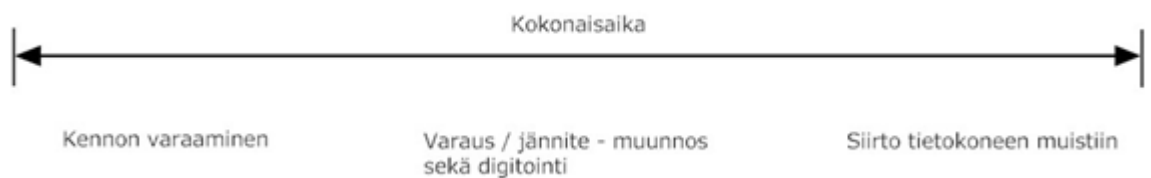


Kuva 41. Vasemmalla vääristynyt kuva sekä oikealla korjattu kuva

Kuvaussysteemin sekä kuvan koon pysyessä samana kalibrointia ei tarvitse tehdä toistuvasti, vaan käyttäjä voi kuvaa korjatessaan viitata aiemmin talletettuun kalibrointitiedostoon. Luonnollisesti kalibrointi on tehtävä uudelleen kuvaussysteemin tai sen osan, kuten objektiivin, muuttuessa. [8.]

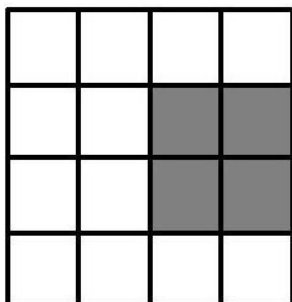
5.6 Kuvausnopeus

Kuvausnopeus on tärkeä ominaisuus konenäkösystemille. Kuvan muodostuminen kameran kennolta tietokoneeseen vaatii kuvainformaatiolta usean eri prosessin läpikäymistä. Kuvanot-tohetken voidaan katsoa alkaneeksi kameran sulkimen auetessa ja altistaessa kennon valolle, mikä aiheuttaa kennon pikseleiden varautumisen suhteessa tulevan valon määrään. Kameran sulkimen mennessä kiinni pikseleiden varaukset luetaan kennotekniikan mukaisesti ja muun-netaan digitaaliseen muotoon, jonka jälkeen data siirretään tietokoneen muistiin. Ajallisesti kennon varaaminen vie kokonaisajasta suurimman osan. Kuvassa 42 on esitetty pääpiirteit-täin kuvanmuodostumisen vaiheet.



Kuva 42. Kuvan muodostamisen vaiheet

Konenäkökameroille voidaan määrittää myös ohjelmallisesti kuvattavan alueen koko, jolloin kuvakoon pienentyessä myös kuvausnopeus voi nopeutua. Periaatekuvassa 43 on esitetty harmaalla kameralle määritellyn kuvattavan alueen koko eli ROI.



Kuva 43. Kuvaan määritetty ROI

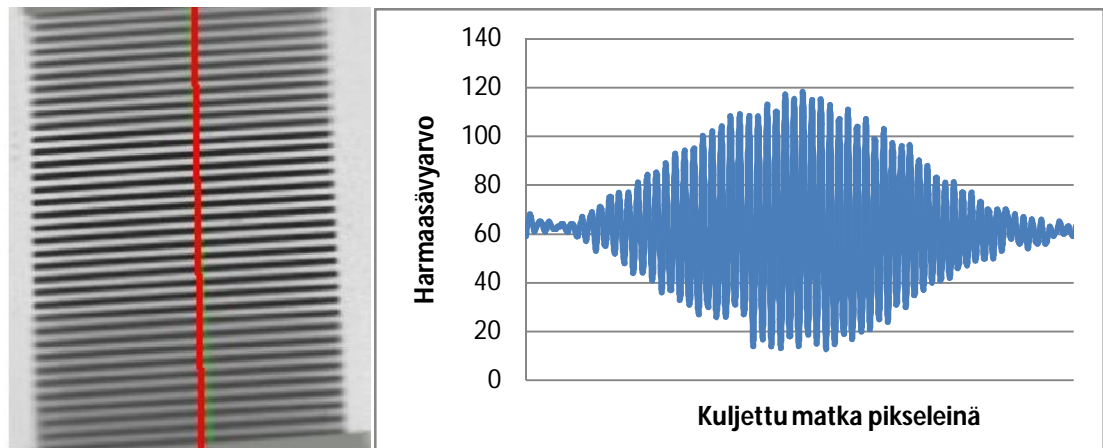
IIDC-spesifikaation mukaisista IEEE 1394 -kameroista löytyy ns. moodi 7, joka mahdollis-taa edellä esitetyn kuvattavan alueen määrittämisen. Myös testeihin valittu uEye-kamera tukee ROI:n asettamista tietyin rajoituksin. Konenäkökameroille voi myös määrittää ns. pixel bin-ning -arvon, jossa useamman pikselin informaatio luetaan yhtenä pikselin arvona. Tässä

työssä kuvausnopeuden määrittämistä varten toteutettu ohjelma pyrkii testaamaan kameran kuvausnopeutta sekä kuvausnopeuden riippuvuutta asetettuun kuvan kokoon nähden. [1, 9.]

5.7 Syvyysterävyyden määrittäminen

Syvyysterävyyttä määrittäessä kameralla kuvataan aikaisemmin esitettyä syvyysterävyyden mittaamiseen kehitettyä testikappaletta. Se asetetaan 45 asteen kulmaan kameraan nähden, jotta syvyysterävyyttä pystyttäisiin mittaamaan testikappaleen viivaparielementtien perusteella. Testikappale koostuu kahdesta pitkittäin asetetusta sekä kahdesta poikittain asetetusta viivaparikaistasta. Niiden viivapariitiheys on 5 viivaparia/mm ja 15 viivaparia/mm. Kaistojen kupeella kulkee myös millimetriasteikko silmämääräistä syvyysterävyyden arviointia varten.

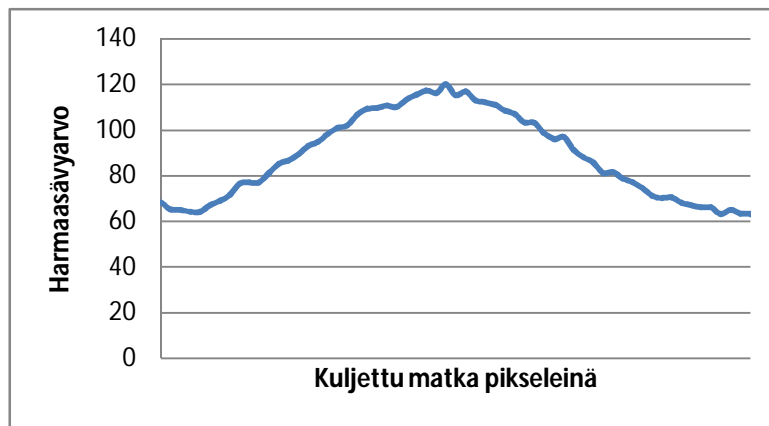
Työhön kehitetty ohjelma analysoi testikappaleesta otetun kuvan yli piirretyn viivan alle jääneiden pikseliarvojen intensiteettivaihteluita. Kuvassa 44 on esitetty mahdollinen testitilanne, jossa on kuvattuna viivaparikaista terävyyalueella sekä viivan määrittelemästä kaistasta piirretty harmaasävyprofiili.



Kuva 44. Viivaparikaistat terävyyalueella sekä analyysistä saatu harmaasävyprofiili

Kuvasta 44 nähdään, että terävyyalueella kohteen viivaparielementeistä saadaan suurempia harmaasävyarvon intensiteettivaihteluita. Siirryttäessä terävyyalueelta kauemmaksi viivaparit eivät enää erotu toisistaan, vaan sulautuvat toisiinsa sekä taustaan. Tämä näkyy myös harmaasävyprofiilissa intensiteettivaihteluiden pienenemisenä.

Syvyysterävyyden määrittämisen kulku alkaa siitä, että ohjelma ottaa vastaan harmaasävyprofiilinäytteen, joka kattaa silmämääräisesti katsottuna koko terävyyalueen. Seuraavaksi ohjelma suodattaa dataa poimimalla profiilin huippuarvot. Suodatuksella pyritään datasta poistamaan sinimuotoinen modulaatio sekä saamaan profiilista yksinkertaisempi. Kuvassa 45 on esitetty suodatettu harmaasävyprofiili.



Kuva 45. Suodatettu data

Tämän jälkeen suodatetusta datasta poimitaan kaavan (6) tarvitsemat parametrit ja lasketaan syvyysterävyyden määrittämisessä käytettävät y-arvot.

$$Y - arvot = MAX - \frac{(MAX - MIN)}{K}, \quad (6)$$

jossa MAX on datan maksimiarvo, MIN minimiarvo ja K on käyttäjän määrittelemä jakaja. Ohjelma käyttää K:n arvona oletusarvoisesti lukua 2.

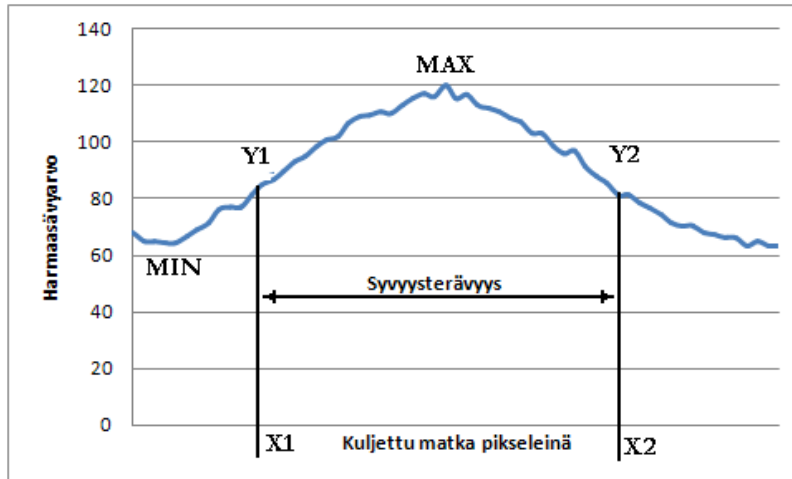
Laskettujen y-arvojen perusteella etsitään vastaavat x-arvot, joita kyseisen profiilin muodosta löydetään kaksi kappaletta. Lopuksi lasketaan syvyysterävyyttä kuvaava lukuarvo pikseleinä yhtälöllä 7.

$$DOF = X2 - X1, \quad (7)$$

jossa X2 sekä X1 ovat yhtälöllä (6) laskettujen y-arvoja vastaavat x-arvot.

Lopullinen funktion palauttama arvo saadaan syöttämälle luodulle funktiolle kohteen taajuus muodossa viivaparia/mm, jolloin funktio laskee raakadatasta DOF-alueen sisään jääneen modulaation perusteella syvyysterävyyden millimetreissä.

Kuvassa 46 on esitetty saadusta datasta poimitut sekä lasketut arvot.



Kuva 46. Suodatetusta datasta poimitut arvot

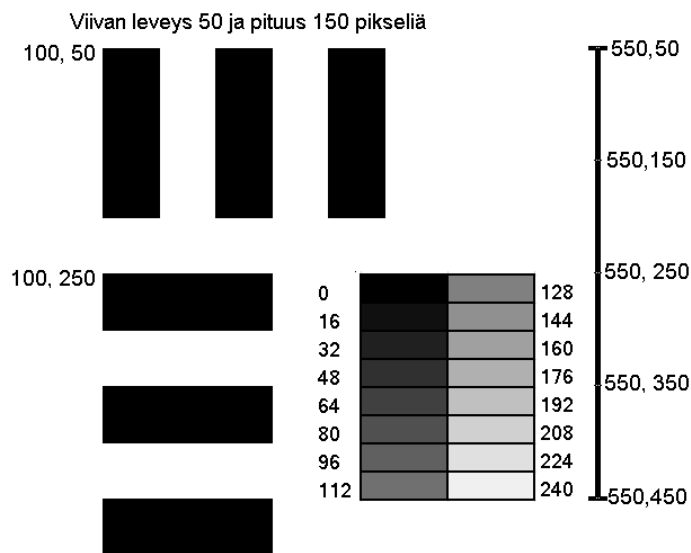
Syvyysterävyysen esittämisen suurimpana haasteena on sen tulkinnanvaraisuus, sillä osalle sovelluksista kuvan tarkkuus reuna-alueilla voi olla riittävä, mutta taas tietyille sovelluksille sama terävyysalue ei enää riitäkään. Tässä työssä pyrittiin kehittämään mittaustapa, joka kertoisi syvyysterävyysen numeerisena arvona.

5.8 Toteutetun ohjelman testaaminen

Ennen kameratestejä toteutetusta ohjelmasta etsittiin ohjelmointivirheitä sekä tarkastettiin ohjelman sisältämän laskennan toimivuutta sekä vastaavuutta käytettyyn teoriaan. Laskennan toimivuus tarkastettiin ohjelman osissa, joihin pystyttiin itse luomaan tarkasti tunnettu testikuva. Tunnettaessa itse tehdyn testikuvan ominaisuudet sekä luodun ohjelman tapa analysoida saatua dataa voidaan ennalta päätellä analyysin tulos. Mikäli luodun testikuvan pohjalta itse laskettu arvo sekä analyysin tulostama arvo täsmäävät, voidaan kyseisen testin toimivuutta pitää haluttuna ja mittaustuloksia oikeina.

Pikseliarvojen sekä kuljetun matkan määrittämisen testaus

Monet toteutetun testiohjelman analyysit perustuvat ROI:n määrittämisen alueen sisältämien pikselien arvoihin sekä määritetyn alueen dimensioihin. Kyseisten toimien testaamiseen luotiin testikuva, jonka kohteiden pikseliarvot sekä dimensiot tunnettiin täsmällisesti. Kuvas-
sa 47 on esitetty testausta varten luotu testikuva.

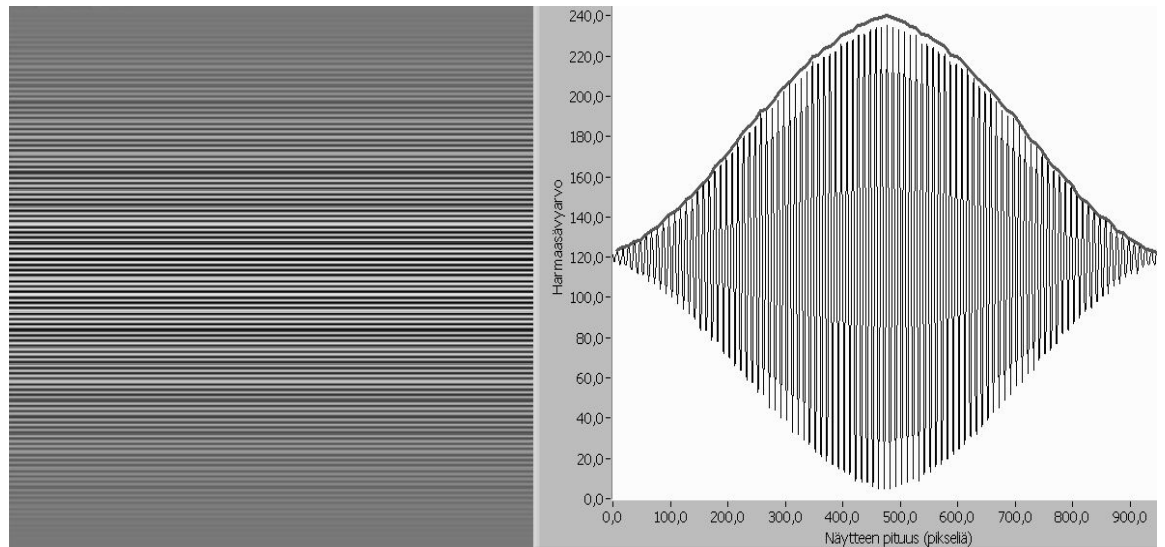


Kuva 47. Kuljetun matkan sekä pikseliarvojen tunnistamiseen luotu testikuva

Testikuvaa analysoitaessa kiinnitettiin huomiota ohjelman ilmoittamiin mittausarvoihin sekä mitattavan kohteen tarkasti tunnettuihin vastaaviin arvoihin. Testit osoittivat ohjelman suoriutuvan sävyarvon tunnistamisessa sekä matkan mittaamisessa moitteettomasti.

Syvyysterävyyden laskemisen testaus

Syvyysterävyyyslaskennan testauksesta varten luotiin testikuva, jonka pystysuora viivaprofiili muistuttaa sinimoduloitua Gaussin käyrää. Kuvassa 48 on esitetty testikuva sekä ROI:n määrittelemien pikseliarvojen perusteelta piirretty harmaasävyprofiili sekä profiilista suodatettu data.



Kuva 48. Syvyysterävyyden laskennan testaamiseen luotu testikuva

Testikuvan sisältämän informaation ollessa täysin ideaalinen toteutettuun laskentaan verrattuna voitiin ennalta tietää analyysin laskema tulos. Ohjelmaa testattaessa luodulla testikuvalla havaittiin, että ROI:n määrittelemä data ennen suodatusta täsmää ennalta tiedettyihin pikselien arvoihin. Suodatuksen jälkeen datassa ilmeni vähäisiä vaihteluita johtuen suodatusfunktion tavasta käsitellä dataa. Myös raakadatan sekä sovitetun datan väliin kuvaajassa jäävä pieni väli johtuu datan sovituksesta, mikä ei olennaisesti vaikuta mittaustuloksiin.

5.9 Testijärjestelyt

Testijärjestelyt ja testiympäristö pyrittiin rakentamaan jokaista testitapahtumaa mahdollisimman hyvin palvelevaksi. Hyvä ja vakaa testiympäristö takaa tasapuoliset olosuhteet testattaville kameroille sekä luo pohjan testien onnistumiselle. Kuvassa 49 on esitetty testausjärjestely.



Kuva 49. Käytetty testijärjestely

Mittauksissa käytettiin aiemmin esitettyjä testikuvioita sekä analysointitapoja. Kuvausympäristön valaistus toteutettiin valaisemalla kohdetta ylhäältä päin pöytävalaisimella sekä tarvittaessa takaa led-valaisimella, joka koostui kolmesta valkoista valoa lähettävästä ledistä. Valaistuksessa hyödynnettiin myös valkoisia paperiarkkeja valon sirottamisessa sekä heijastamisessa, jotta kuvaolosuhteet olisivat mahdollisimman ideaaliset.

Itse kamera kiinnitettiin kiskon kelkalle asetettuun pidikkeeseen kohtisuoraan testikuvioita vastaan, minkä jälkeen kameran objektiivi tarkennettiin testikuvioon. Kameran objektiivin

ollessa kohdistettu testikuvion kohteisiin sekä kohteiden ja taustan kontrastin ollessa ideaalinen voitiin kameralla suorittaa kuvaaminen.

Syvyysterävyyttä määrittäessä eri kokoisilla objektiivin aukoilla jouduttiin kuvausympäristön valaistustehoa kasvattamaan tuomalla valaisin yhä lähemmäksi testikuviota objektiivin fyysisen aukon pienentyessä. Kennon lineaarisuutta testattaessa paljaalla kennolla pidettiin kennon edessä valkoista paperiarkkia sirottamassa valoa mahdollisimman tasaisesti.

MTF-mittausten yhteydessä tutkittiin tarkemmin kuvausympäristön aiheuttamaa kohinaa kuvainformaatioon. Kohinan mittausta toteutettiin objektiivin aukkoluvun ollessa neljä. Kuvat otettiin kameran oletusparametriarvoilla, jolloin suljimen nopeus käytetyillä kameroilla oli pienempi kuin 50 ms.

Osassa testejä jouduttiin objektiivien yhteydessä käyttämään loittorenkaita, jotta kuvan suurenus olisi analyysia varten ollut riittävä. Syvyysterävyuden määrittämisessä sekä MTF-mittauksissa käytettiin objektiivin lisäksi 1 mm:n loittorengasta. Kuvausvääristymiä määrittäessä jouduttiin loittorenkaita lisäämään 3,5 mm, jotta pistekuvion pisteet olisivat kattaneet koko kuvautuvan alueen. Koska objektiivit suunnitellaan tietylle polttovälille, on testeistä saatuihin tuloksiin suhtauduttava loittorenkaiden käytön takia varauksella.

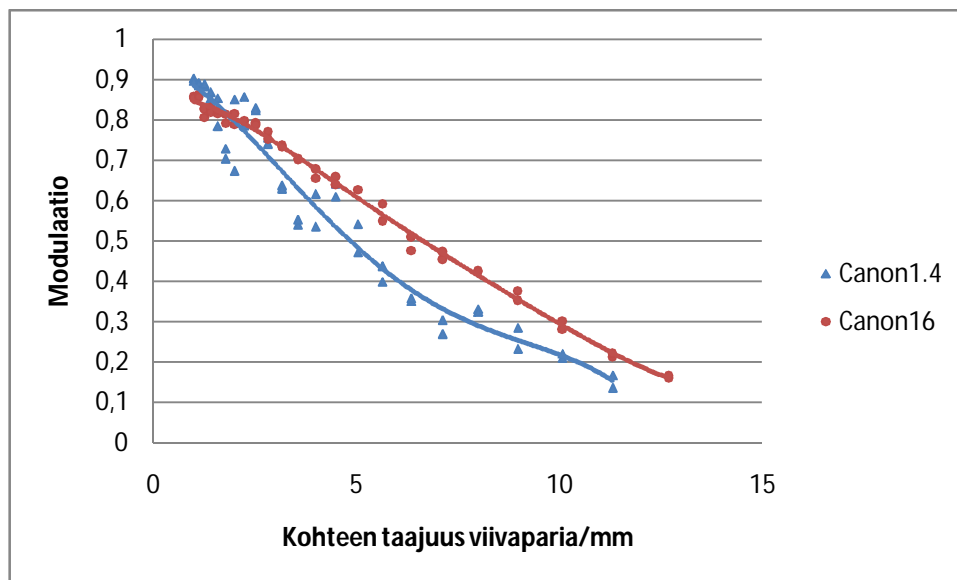
6 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Kameroiden testaus suoritettiin toteutetulla testipenkillä aiemmin esitellyille kameroille sekä objektiiveille. Jokainen testivaihe suoritettiin huolella useaan kertaan, jotta tulokset olisivat luotettavia sekä testien toistettavuus tulisi varmennettua. Seuraavissa luvuissa on esitetty saadut tulokset testatuille kameroille sekä objektiiveille.

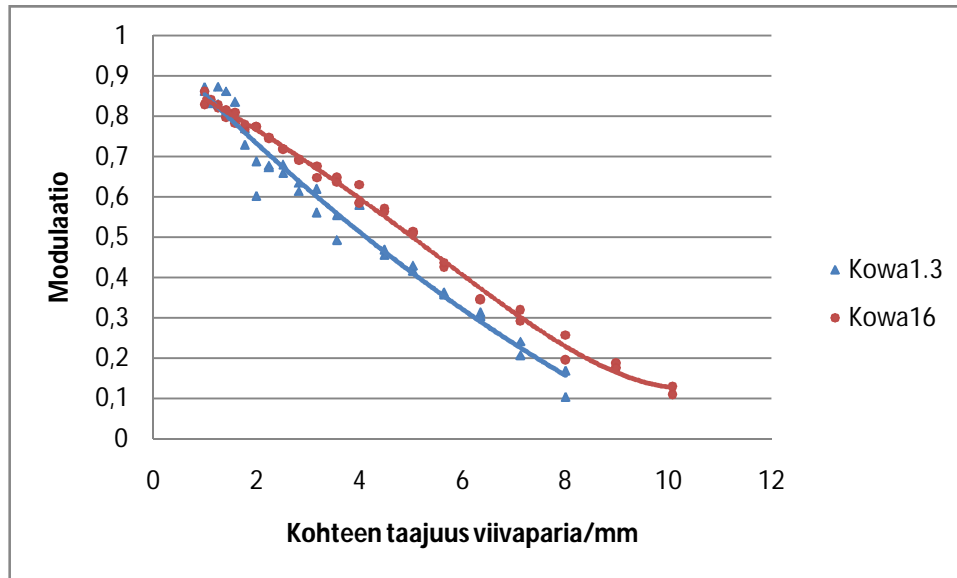
6.1 uEye1545LE-kameran tulokset

Modulaation siirtofunktio

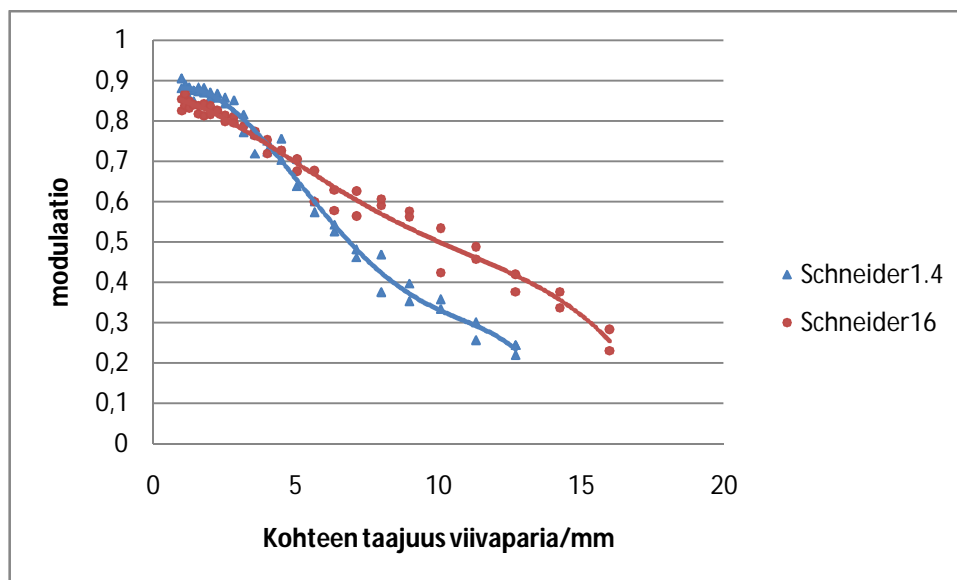
Modulaation siirtofunktion määrittämisessä tarkasteltiin kuvaussysteemin piirtokykyä yhä kasvavilla paikkataajuuksilla. uEye1545LE-kamera testattiin edellä esitetyn testausmenetelmän mukaisesti kaikille testiin valituille objektiiveille kahdella eri aukkoluvulla. Kuvissa 50, 51 ja 52 on esitetty objektiiveille saatu modulaatio kohteen paikkataajuuden kasvaessa eri aukkoluvulla.



Kuva 50. Canon-objektiivin MTF-kuvaaja



Kuva 51. Kowa-objektiivin MTF-kuvaaja



Kuva 52. Schneider-objektiivin MTF-kuvaaja

Kuvissa 50, 51 ja 52 on esitetty kulloisenkin kuvaussysteemin MTF-kuvaaja eri objektiivin aukkoluvuilla. Kuvien pisteet esittävät mittaustapahtuman tarkkaa mittaustulosta sekä viiva esittää mittaustulosten trendiä. Mittauksia suoritettiin jokaiselle objektiiville modulaation arvoon 0,2 saakka.

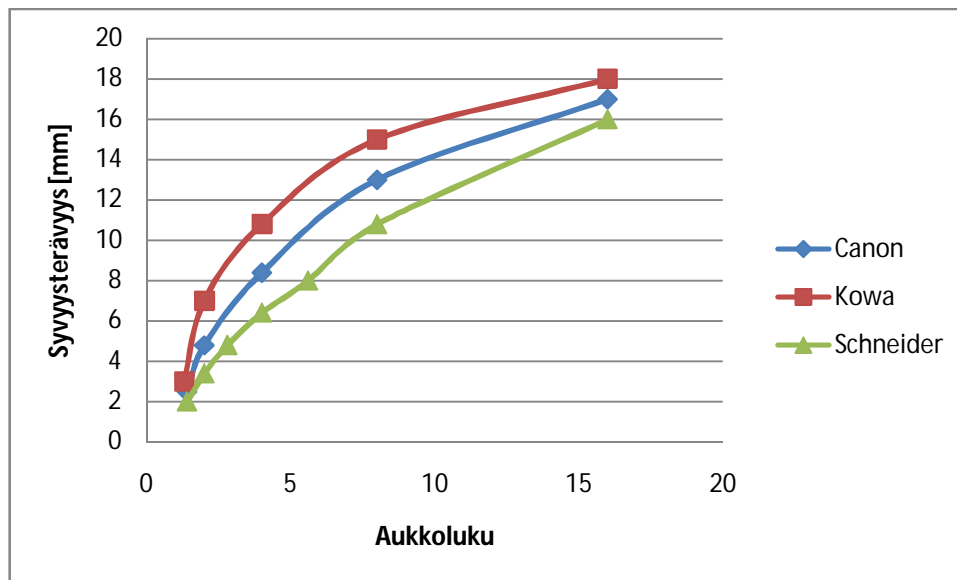
Mittaustuloksista on nähtävissä, että Schneiderin sekä Canonin objektiivien piirtokyky on parempi verrattuna Kowan objektiivisiin. Schneiderin objektiivi erotti viivaparielementit kohteen taajuuden ollessa 15 viivaparia/mm, kun taas Canonin objektiivilla päästiin taajuuteen

12 viivaparia/mm. Kowan objektiivin piirtokyky rajoittui taajuuteen 9 viivaparia/mm. Canonin objektiivilla ilmeni hajontaa erotuskyvyssä kuvattaessa suurella aukon fyysisellä koolla. Tämä ilmeni mitattaessa saman paikkataajuuden omaavia pysty- sekä vaakatasossa olevia viivaparielementtejä, joille lasketut modulaatiot poikkesivat suuresti toisistaan. Syy poikkeamiin selittyi viivaparielementtien syrjäisestä sijainnista optiseen akseliin nähden.

Kuvista on myös nähtävissä objektiivin aukon koon vaikutus piirtokykyyn. Siirryttäessä yhä suurempiin paikkataajuuksiin suurella aukkoluvulla objektiivin piirtokyky on selvästi parempi, jolloin saatu modulaatio säilyy suurempana pidempään verrattuna pienellä aukkoluvulla saatuun tulokseen.

Syvyysterävyys

Syvyysterävyysmittauksissa oltiin kiinnostuneita kohteeseen tarkennetun objektiivin syvyysterävyydestä sekä aukkoluvun vaikutuksesta syvyysterävyden pituuteen. Kuvassa 53 on esitetty aukkoluvun vaikutus syvyysterävyteen käytetyille objektiiveille.

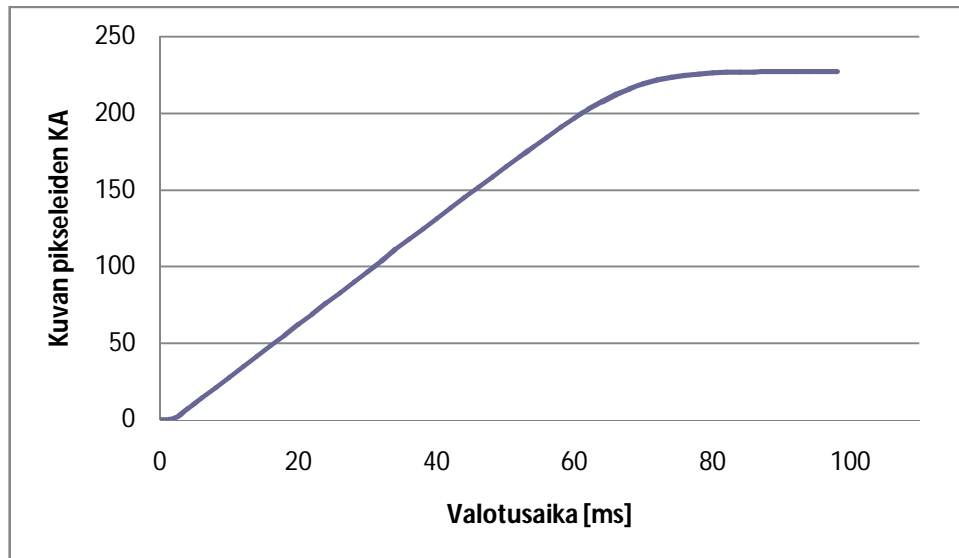


Kuva 53. Aukkoluvun vaikutus syvyysterävyteen

Testeissä valaistuksen säätäminen kulloisellekin aukkoluvulle oli hankalaa etenkin mittaustulosten ääripäissä. Mittaustuloksista on selvästi nähtävissä, että teorian mukaisesti syvyysterävyys kasvaa objektiivin aukkoluvun kasvaessa.

Kennon lineaarisuus

Kennon vasteen lineaarisuutta tasaisessa valaistuksessa testattiin altistamalla pelkkä kenno valkoisen paperiarkin läpi sironneelle valolle kasvavin altistusajoin. Testissä vasteeksi laskettiin saadun kuvan pikseliarvojen keskiarvo. Kuvassa 54 on esitetty uEye1545LE-kameran vaste suoritetussa mittauksessa.

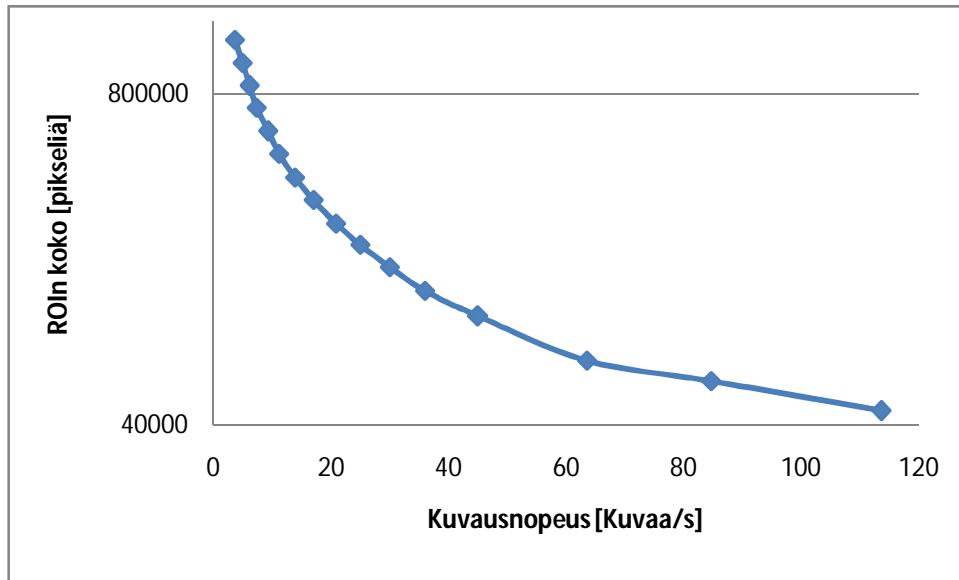


Kuva 54. uEye1545LE-kameran kuvan vaste valotusajan funktiona

Mittauksen haasteena oli säätää valaistus siten, että suurimmalla mahdollisella valotusajalla saataisiin kuvan pikseliarvot maksimiin eli arvoon 255. Kuvasta 54 on nähtävissä, että kennon vaste on lineaarinen valotusaikaan 70 ms saakka, jolloin kuvan pikseliarvojen keskiarvo ei enää kasva lineaarisesti. Tämä johtuu testivaiheen valaistuksen voimakkuudesta, mikä ei kyseisessä testissä riittänyt saamaan kennoa saturaatioon. Testituloksesta voi kuitenkin päätellä, että valaistuksen puitteissa kenno vastaa lineaarisesti tulevan valon määrään.

Kuvausnopeus

Kuvausnopeuden määrittämisessä tarkasteltiin kameralle määrätyn ROI:n vaikutusta kuvausnopeuteen. Kuvassa 55 on nähtävissä testissä saadut tulokset.



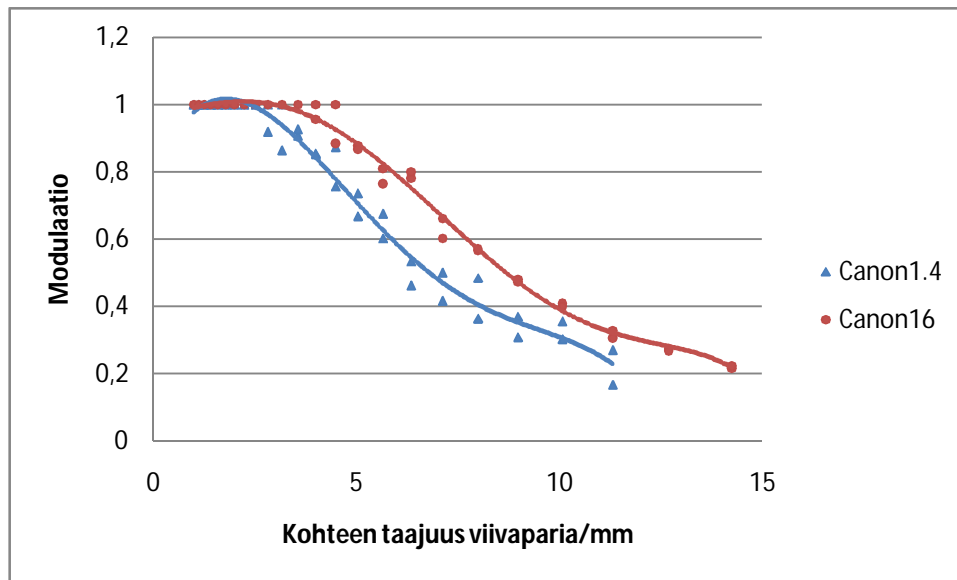
Kuva 55. ROI:n vaikutus kuvausnopeuteen

Testi suoritettiin pienentämällä ROI:n kokoa kameran maksimiresoluutiosta kymmenellä prosentilla per mittaus. Mittaukset ajettiin esitellyllä periaatteella viidenkymmenen sekä sadan kuvan sarjoille. Kuvasta 55 on selvästi nähtävissä, että ROI:n koko vaikuttaa huomattavasti kuvausnopeuteen. Määriteltäessä kameran käyttämään yhä pienempää osaa kennosta kuvausnopeus kasvaa merkittävästi päästäen jopa yli sadan kuvan sekuntinopeuteen.

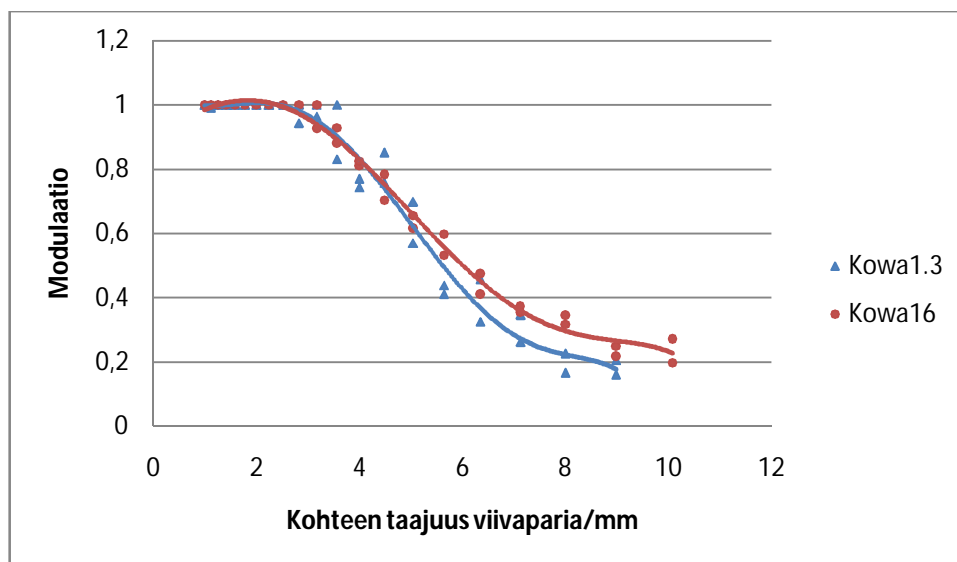
6.2 Foculus442SB-kameran tulokset

Modulaation siirtofunktio

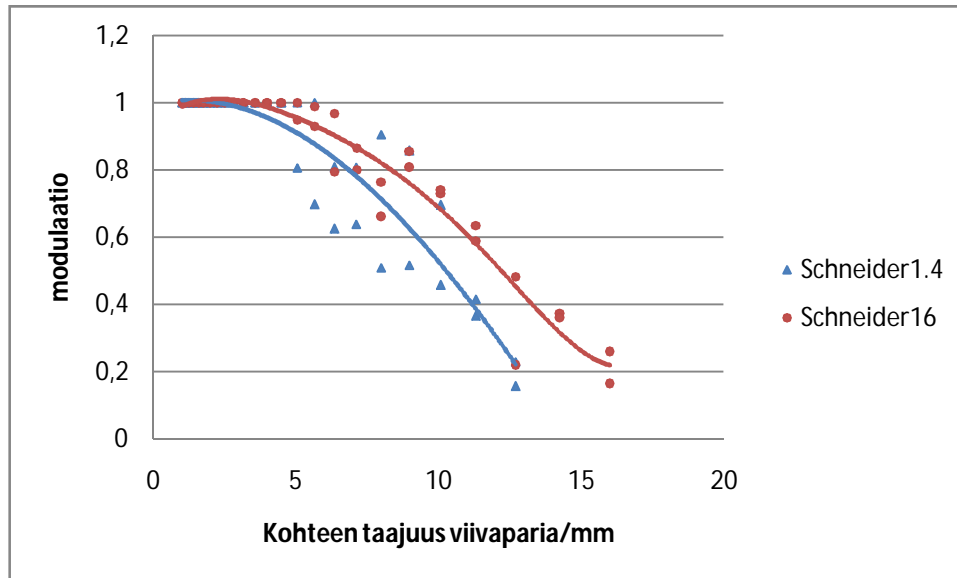
Foculus442SB-kamera testattiin edellä esitetyn testausmenetelmän mukaisesti kaikille testiin valituille objektiiveille kahdella eri aukkoluvulla. Kuvissa 56, 57 ja 58 on esitetty objektiiveille saatu modulaatio kohteen paikkataajuuden kasvaessa eri aukkoluvuilla. Kuvien pisteet esittävät mittaustapahtuman tarkkaa mittaustulosta sekä viiva mittaustuloksien trendiä.



Kuva 56. Canon-objektiivin MTF-kuvaaja



Kuva 57. Kowa-objektiivin MTF-kuvaaja



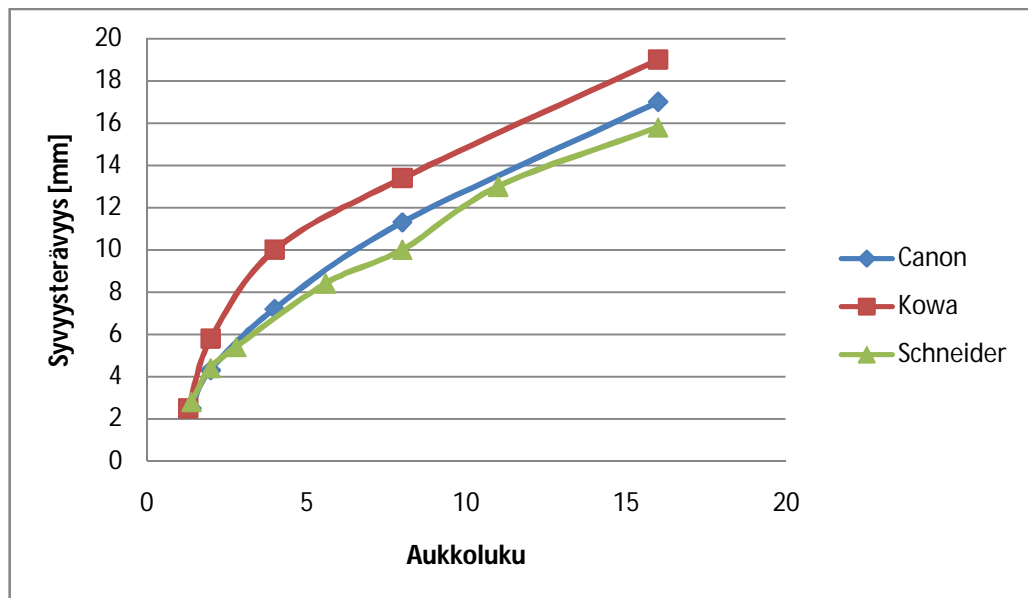
Kuva 58. Schneider-objektiivin MTF-kuvaaja

Testeissä havaittiin, että suurilla paikkataajuuksilla Foculus442SB-kameran erotuskyky oli aavistuksen verran heikompi analysoitaessa vaakatasoon asetettuja viivaparielementtejä. Tämä johtuu siitä, että Foculus442SB-kameralla on vähemmän pikseleitä käytettävissä y-suuntaisesti. Testeissä analysoitiin myös pystytasoon asetettuja viivaparielementtejä, jolloin tilanne kameroiden osalta tasoittuu.

Tuloksista on nähtävissä Foculus442SB-kameralla päästään samoihin erotuskykytarkkuuksiin kuin uEye1545LE-kameralla käytettäessä samoja objektiiveja. Tuloksista on myös nähtävissä, että Foculus442SB toistaa kontrastin vaihteluita selvästi paremmin kuin uEyen kamera. Tämä näkyy Foculus442SB tuloksissa modulaation säilymisenä korkeampana siirryttäessä yhä suuremmille kohteen paikkataajuuksille.

Syvyysterävyys

Syvyysterävyyssmittauksissa oltiin kiinnostuneita kohteeseen tarkennetun objektiivin syvyysterävyydestä sekä aukkoluvun vaikutuksesta syvyysterävyyden suuruuteen. Kuvassa 59 on esitetty aukkoluvun vaikutus syvyysterävyyteen käytetyille objektiiveille.

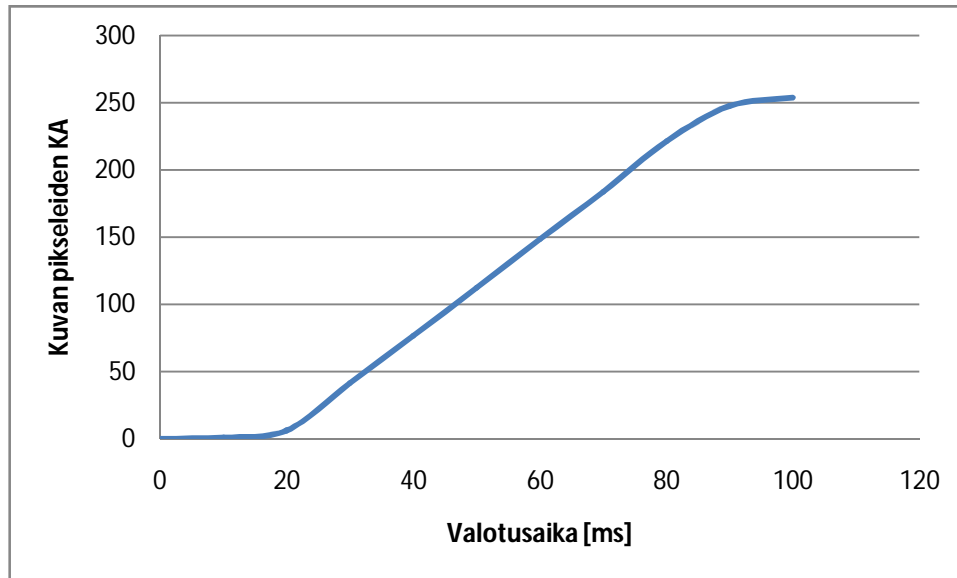


Kuva 59. Aukkoluvun vaikutus syvyysterävyyteen

Kuvan 59 mittaustuloksista on nähtävissä, että suurta eroa uEye1545LE-kameran tuloksiin ei juuri ole. Objektiivien tuloksista piirretyt käyrät ovat saman suuntaisia ja kulloisellekin objektiiville ominaisia. Mittaushetkellä syvyysterävyyden mittaustuloksessa esiintyi pientä vaihtelua johtuen valaistuksesta, joten varsinaiseksi tulokseksi pyrittiin valitsemaan keskiarvo.

Lineaarisuus

Kennon vasteen lineaarisuutta tasaisessa valaistuksessa testattiin altistamalla pelkkä kenno valkoisen paperiarkin läpi sironneelle valolle kasvavin altistusajoin. Testissä vasteeksi laskettiin saadun kuvan pikseliarvojen keskiarvo. Kuvassa 60 on esitetty Foculus442SB-kameran vaste suoritettussa mittauksessa.

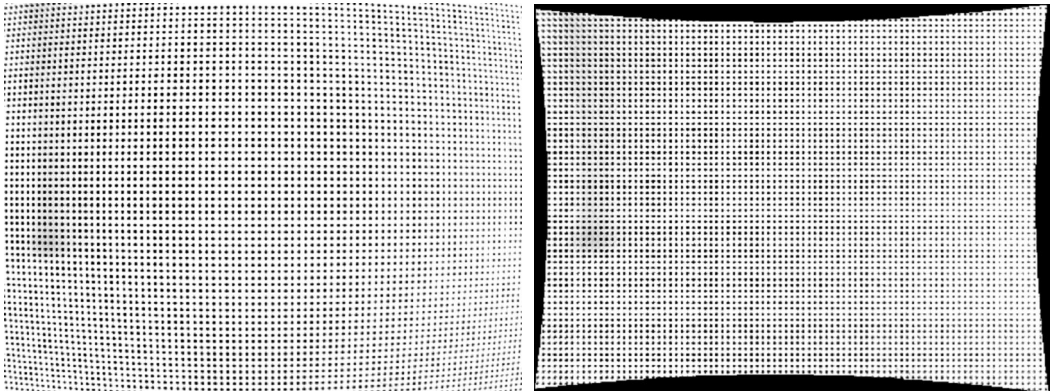


Kuva 60. Foculus442SB-kameran kuvan vaste valotusajan funktiona

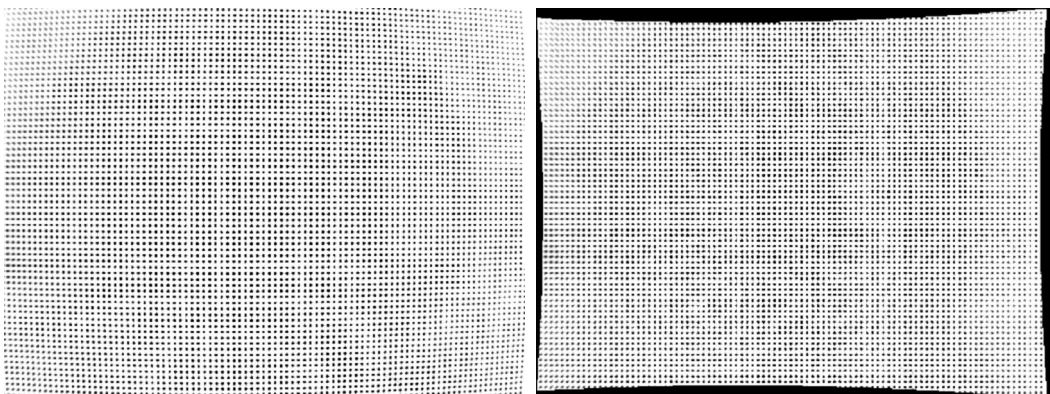
Testeissä havaittiin Foculus442SB-kameran olevan herkempi samassa valaistuksessa verrattuna uEye1545LE-kameran antamaan vasteeseen. Jotta useita mittaustuloksia voitiin ottaa asetetun maksimivalotusajan sisällä, täytyi Foculus442SB-kameran kenno peittää kolminkertaisella paperiarkilla. Tämä kuitenkin johti siihen, että alle 20 ms valotusajalla ei vastetta kameralta juuri saatu. Testituloksesta on nähtävissä, että valaistuksen puitteissa kenno vastaa lineaarisesti valon määrään.

Kuvausvirheet

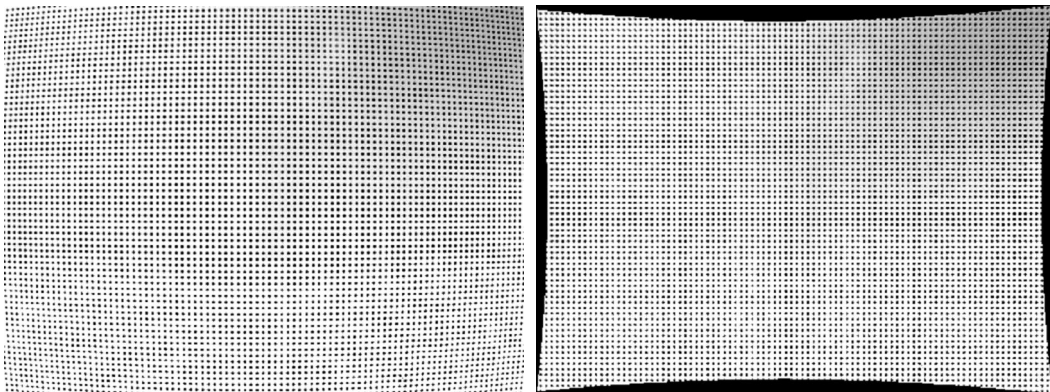
Testit osoittivat, että kuvausvääristymiä määriteltäessä testatuille kameroille saatiin lähes identtiset tulokset, joten voitiin olettaa kuvausvääristymien rajoittuvan käytettyihin objektiivihin. Tästä syystä seuraavaksi esitetyt tulokset on rajattu Foculus442SB-kameralla otettuihin kuviin. Kuissa 61, 62 ja 63 on esitetty testatuilla objektiivilla otetut vääristyneet kuvat sekä ohjelmalla kalibrointitietojen avulla laskennallisesti korjatut kuvat.



Kuva 61. Canon-objektiivilla otettu vääristynyt kuva vasemmalla ja korjattu kuva oikealla



Kuva 62. Kowa-objektiivilla otettu vääristynyt kuva ja vasemmalla ja korjattu kuva oikealla



Kuva 63. Schneider-objektiivilla otettu vääristynyt kuva vasemmalla ja korjattu kuva oikealla

Analyysin tuloksista on nähtävissä, että kaikki käytetyt objektiivit aiheuttivat kuvaan voimakkaan tynnyrimäisen vääristymän. Kuva on jokaisen objektiivin kohdalla vääristynyt erityisesti reuna-alueiltaan. Tämä on ominaista lyhyen polttovälin objektiiveille. Kuvista on myös nähtävissä, kuinka vääristyneen kuvainformaation hylkääminen jättää korjattuun kuvaan mustat reunukset. Kuitenkin korjatun kuvan sisään jäänyt kuvainformaatio on vääristymistä vapaa ja

vastaa mittasuhteiltaan todellista kohdetta, jolloin kuvasta suoritettut mittaukset ovat tarkempia.

Kuvausympäristön kohina

Kohinan mittauksissa ilmeni epävakaan valaistuksen aiheuttavan kuvaan suuria intensiteetti-poikkeamia. Tarkasteltaessa kymmenen kuvan sarjaa viidenkymmenen millisekunnin altistusajalla normaalivalaistuksessa suurimmat kohinapiikit olivat pikseliarvoltaan viidentoista luokkaa. Kuvattaessa yhden sekunnin valotusajalla heikossa valaistuksessa, huomattiin kohinan kasvavan merkittävästi. Suurimmat kohinapiikit olivat tässä tapauksessa pikseliarvoltaan noin 40.

6.3 Tulosten tarkastelu

Testit osoittivat niissä saatujen tuloksien olevan esitetyn teorian mukaisia. MTF-mittauksissa kameroiden välillä ilmeni selvä ero modulaation sekä kontrastin toistamisen suhteen. FO442SB-kamera toisti kontrasteja paremmin, jolloin modulaatio säilyi korkeana kauemmin siirryttäessä yhtä suuremmille kohteen paikkataajuuksille. Verrattaessa FO442SB kameraan uEye1545LE-kameralla otetun kuvan kohteiden analyysistä saatuun modulaatioon huomataan modulaation alkavan heikompänä heti ensimmäisestä mittauksesta lähtien. Kiinnittäessä huomiota erotuskykyyn havaitaan, että uEye1545LE-kamera on aavistuksen parempi erotuskyvyssä erityisesti kuvattaessa vaakatasoon asetettuja viivaparielementtejä. Tämä selittyy kennon koolla sekä kennolla käytettävien pikseleiden pienemmällä koolla sekä suuremmalla määrällä.

Kennon lineaarisuutta tutkittaessa huomattiin molempien kennojen vastaavaan lineaarisesti kasvavan valon määrään tiettyyn raja-arvoon asti. Tämän raja-arvon määrää testin valaistuksen voimakkuus. Analyysin laskiessa pikseliarvojen keskiarvoa 8-bittiselle harmaasävykuvalle huomattiin, että valaistuksen säätäminen testille ideaaliseksi oli hankalaa. Käytännön testeissä valaistus säädettiin siten, että asetetulla maksimisuljinajalla päästäisiin mahdollisimman lähelle saturaatiota. Testeissä ilmeni Foculus442SB-kameran olevan samassa valaistuksessa herkempi valolle kuin uEye1545LE-kamera. Tästä syystä testeissä jouduttiin käyttämään samassa valaistuksessa Foculus442SB-kameran kennon edessä kolminkertaista paperiarkkia verrattu-

na uEye1545LE-kameran yhden paperiarkin paksuuteen, jolloin Foculus442SB-kameran vastate saatiin pysymään asetettujen rajojen sisällä. Testit osoittivat kamerasen kennojen vastaavan kulloisenkin valaistuksen puitteissa lineaarisesti tulevaan valonmäärään.

Syvyysterävyyttä määriteltäessä testattujen kameroiden välillä eroa ei juuri ollut, sillä kaikille käytetyille objektiiville saatiin lähes samantlaiset mittaukset. Mittauksen suurimpana haasteena oli luoda jokaiselle aukon koolle ideaalinen valaistus, jotta mittaus voitaisiin suorittaa. Myös syvyysterävyuden määrittämiseen käytetyt testikuvion reunimmaisat viivaparikaistat eivät olleet kohtisuorassa objektiivin vasten. Ideaalisessa testissä viivaparikaista tulisi kulkea linssin keskipisteen kautta.

Objektiivien aiheuttamia vääristymiä määriteltäessä huomattiin käytettyjen objektiivien aiheuttavan kuvaan suuren tynnyrimäisen vääristymän. Osaksi suuren vääristymän selittävät pienen polttovälin objektiivit sekä niissä käytetyt loittorengaat. Testit osoittivat myös, että kalibroitiedoston luominen käytetyllä tietokoneella oli raskas prosessi.

Kohinan mittauksissa ilmeni epävakaa valaistuksen aiheuttavan kuvaan suuriakin intensiteetti-eroja otettujen kuvasarjojen välillä. Tämä näkyi testeillä molemmilla kameroilla kuvan välkkymisenä kuvattaessa jatkuvaa kuvaa pienellä suljinajalla. Kymmenen kuvan sarjassa havaittiin, että kuvainformaatioissa suurimmat kohinapiikit olivat pikseliarvoltaan viidentoista luokkaa, mitä ei 8-bittisessä harmaasävykuvassa silmällä voi erottaa. Kohinan ilmenemistä pitkällä valotusajalla testattiin Foculus442SB-kameralla. Kuvattaessa yhden sekunnin valotusajalla heikossa valaistuksessa, huomattiin kohinan kasvavan merkittävästi. Suurimmat kohinapiikit olivat tässä tapauksessa pikseliarvoltaan noin 40. Näin suuren kohinan 8-bittisessä harmaasävykuvassa on jo erotettavissa.

Yhteenvetona Foculus442SB-kameraa voidaan pitää parempana verrattuna uEye1545LE-kameraan tarkasteltaessa kontrastin vaihteluiden toistoa sekä mahdollisuutta säätää useampia kameraan vaikuttavia parametreja ohjelmallisesti. Testiryhmän objektiiveista Schneider-objektiivin erottelukyky oli paras ja sillä saadut kuvat olivat laadukkaita eri aukkoluvuilla.

7 YHTEENVETO

Tämän insinööritoiminnan tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Firewire- ja USB2.0 -liitäntäisille konenäkökameroille testipenkki, jossa kameran sekä käytetyn optiikan ominaisuuksia voitiin testata. Työn toteuttaminen sisälsi testausjärjestelmän suunnittelun, toteuttamisen sekä testaamisen.

Suunnitteluvaiheessa tutustuttiin kameratekniikkaan ja kuvan laadun arvioimiseen sekä käytävissä oleviin resursseihin. Toteutusvaiheessa suunniteltiin testipenkkiin tarvittavat testikuvioiden ja kameroiden pidikkeet, tilattiin testiin valitut testikuviot sekä toteutettiin testiohjelma. Ohjelma sisälsi käyttöliittymän toteuttamisen sekä käytettyyn teoriaan pohjautuvan kuva-analyysin sekä laskennan. Testausvaihe sisälsi toteutetun ohjelman toimintojen testaamisen sekä lopulta kameroiden sekä objektiivien testaamisen.

Testauksen perusteella havaittiin, että toteutetun ohjelman antamat tulokset olivat samansuuntaisia esitetyn teorian kanssa. Suurimmaksi ongelmaksi osoittautui testausympäristön valaistus, jonka säätäminen jokaiselle testille ideaaliseksi oli hankalaa. Epäideaalinen testikohteen valaistus johtaa useimmiten mittauksen epäonnistumiseen tai väärään tulokseen, joten testipenkin jatkokehityksessä olisi syytä seuraavaksi kiinnittää huomiota ideaalisen valaistuksen toteuttamiseen. Jatkokehityksessä olisi myös syytä muokata testikuvion pidikkeitä siten, että kohde testikuvioista voitaisiin säätää keskelle optista akselia.

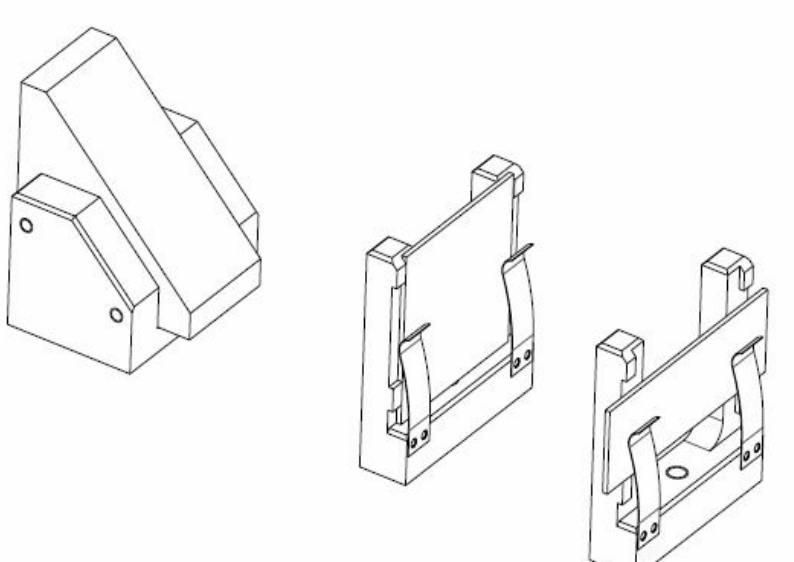
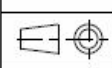

Kameroiden sekä objektiivien testeistä saadut mittaustulokset olivat odotetun kaltaisia ja tukivat käytettyä teoriaa. Testien toistaminen samalla kuvaussysteemillä sekä samoilla parametreilla ei vaikuttanut suuresti tuloksiin, joten testien toistettavuutta voidaan pitää hyväksyttävänä.

LÄHTEET

- 1 Holst Gerald, CCD arrays, cameras and displays, second edition, ISBN 0-8194-2853-1
- 2 Romppainen Pentti, Konenäkö, Kajaanin AMK, 2006 opintomateriaali
- 3 El Gamal A, Eltoukhy Helmy. CMOS Image Sensors, IEEE circuits and Devices Magazine, 21 (2005) [PDF-dokumentti]
- 4 Laurin Publishing, Photonics Spectra, CMOS vs CCD: Maturing Technologies, Maturing Markets [PDF-dokumentti]
- 5 Hect Eugene, Optics, third edition, ISBN 0-201-30425-2
- 6 Meyer-Arendt Jurgen, Introduction to classical & modern optics, third edition, ISBN 0-13-499039-0
- 7 Romppainen Pentti, Teknillinen optiikka, Kajaanin AMK, 2006 opintomateriaali
- 8 National Instruments, NI Vision concepts manual 2007, [PDF-dokumentti]
- 9 Bravo-Zanoguera M, Rivera-Castillo J, Vera-Perez M, Carranza M. Use of the Modulation Transfer Function to Measure Quality of Digital Cameras. Electronics, Communications and Computers, IEEE 2006 [PDF-dokumentti]
- 10 Optikos Corporation, How to Measure MTF and other Properties of Lenses, 1999 [PDF-dokumentti]

LIITTEIDEN LUETTELO

LIITE 1 SUUNNITELLUT PIDIKKEET

	4	3	2	1	
D					
	Vers.	Description		Date	
C					
B					
A	6	DOF515KP			
	5	JOUSI170907KP			
	4	K05446	V1.0	CLAMP	
	3	K05447	V1.0	CLAMP	
	2	TARG060907			
	1	USAF1951KP			
	Item	Part No.	Vers.	Description	Notes
	Prepd		Checked		Approved
	Material		Treatment		Tolerance
					Sheet 1/1
		Scale 0.600		Title	
		Item No. PITIMET060907 Drawing No. PITIMET060907		Item Ver.	

